



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA



**Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables  
Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente**

## **Título**

**“PREDICCIONES DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO EN  
EL PERIODO 1986-2050 EN LA RESERVA BIOLÓGICA CERRO  
PLATEADO, PARROQUÍA NUEVO PARAISO, PROVINCIA DE  
ZAMORA CHINCHIPE”**

Tesis de Grado Previa a la Obtención  
del Título de: **INGENIERA  
EN MANEJO Y  
CONSERVACIÓN DEL  
MEDIO AMBIENTE**

**AUTORA:** Blanca Nohely Silva Cartuche.

**DIRECTOR:** Ing. Aníbal González Mg Sc.

**Loja - Ecuador**

**2020**

*No todos ocupan los  
mejores puestos, sino  
los más preparados,  
aunque no sean genios.*

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR****CENTRO DE  
INVESTIGACIONES  
TERRITORIALES - CIT**

M. Sc. Aníbal Eduardo González González  
DIRECTOR DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES TERRITORIALES (CIT)

CERTIFICA:

En calidad de Director de Tesis “PREDICCIONES DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO EN EL PERIODO 1986-2050 EN LA RESERVA BIOLÓGICA CERRO PLATEADO, PARROQUÍA NUEVO PARAISO, PROVINCIA DE ZAMORA CHINCHIPE” de autoría de la señorita Blanca Nohely Silva Cartuche, egresada de la carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, CERTIFICO que el día 10 de febrero del presente año en curso, se verificó la FINALIZACIÓN de las actividades programadas en el proyecto de tesis

Se expide el presente Certificado, para los fines que el interesado lo considere conveniente.

Loja. 10 de febrero de 2020

Atentamente.



Escrito electrónicamente por  
ANIBAL EDUARDO  
GONZALEZ  
GONZALEZ

M. Sc. Aníbal Eduardo González González  
DIRECTOR CENTRO DE INVESTIGACIONES TERRITORIALES

[anibal.gonzalez@unl.edu.ec](mailto:anibal.gonzalez@unl.edu.ec)

Cédula: 1101845863

Celular: 0989838085

## CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL

EN calidad de tribunal calificador de la tesis titulada **“PREDICCIONES DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO EN EL PERIODO 1986-2050 EN LA RESERVA BIOLÓGICA CERRO PLATEADO, PARROQUIA NUEVO PARAÍSO, PROVINCIA DE ZAMORA CHINCHIPE”**, de autoría de la señorita Blanca Nohely Silva Cartuche, egresada de la carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente certificamos, que se han incorporado todas las sugerencias efectuadas por sus miembros.

Por lo tanto, autorizamos a la señorita egresada, su publicación y difusión.

Loja, 11 de Septiembre del 2020

Atentamente,

Ing. Erasmo Vinicio Alvarado Jaramillo, M.Sc.

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



Firmado digitalmente por:  
ERASMO VINICIO  
ALVARADO  
JARAMILLO

Ing. Carlos Guillermo Chuncho M, Mg Sc

**VOCAL DEL TRIBUNAL**



Firmado digitalmente por:  
CARLOS GUILLERMO  
CHUNCHO MOROCHO

Blgo. Xavier Alejandro Rojas Ruilova, Mg Sc

**VOCAL DEL TRIBUNAL**



Firmado digitalmente por:  
XAVIER  
ALEJANDRO ROJAS  
RUILOVA

## AUTORÍA

Yo, Blanca Nohely Silva Cartuche me ser autora del presente trabajo de tesis titulada **“PREDICCIONES DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO EN EL PERIODO 1986-2050 EN LA RESERVA BIOLÓGICA CERRO PLATEADO, PARROQUÍA NUEVO PARAISO, PROVINCIA DE ZAMORA CHINCHIPE”** y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.



Firando electrónicamente por:  
BLANCA NOHELY  
SILVA CARTUCHE

.....  
Blanca Nohely Silva Cartuche

1150033114

Loja, 01 de Octubre de 2020

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DE LA  
AUTORA PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O  
TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO  
COMPLETO**

Yo, **Blanca Nohely Silva Cartuche**, declaro ser autora, de la tesis titulada **"PREDICCIONES DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO, EN EL PERIODO 1986-2050 EN LA RESERVA BIOLÓGICA CERRO PLATEADO, PARROQUIA NUEVO PARAISO, PROVINCIA DE ZAMORA CHINCHIPE"**, como requisito para optar al grado de: **Ingeniera en Manejo y Conservación del Medio Ambiente**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, al primer día del mes de octubre de dos mil veinte, firma la autora.

Firma:



Blanca Nohely  
Silva Cartuche

Autora: Blanca Nohely Silva Cartuche

Número de cédula: 1150033114

Dirección: Las Pitias

Correo electrónico: [bsilvac@unl.edu.ec](mailto:bsilvac@unl.edu.ec)

Telefono: 2615769

Celular: 0986516690

**DATOS COMPLEMENTARIOS:**

Director de tesis: Ing. Anibal Eduardo González González Mg.Sc.

Tribunal de grado: Ing. Vinicio Erasmo Alvarado Jaramillo Mg.Sc.

Ing. Guillermo Chuncho Mg.Sc.

Blgo. Xavier Alejandro Rojas Ruilova Mg.Sc

## AGRADECIMIENTO

A Dios, porque ha guiado mi camino otorgándome de sabiduría, inteligencia y fuerzas para culminar con éxito un sueño anhelado, y poder servir a la sociedad con mis conocimientos.

A la Universidad Nacional de Loja, por la acogida brindada en sus aulas y prepararnos con ética y responsabilidad.

A mi director de tesis, Ing. Aníbal González por sus sugerencias para el presente proyecto de investigación. A cada uno de los docentes de la carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Renovables, que compartieron sus valiosos conocimientos y me permitieron formarme.

A mis padres y hermanos que han puesto su confianza y han sido un pilar fundamental en mi vida con su amor incondicional.

Gracias a cada uno por su apoyo y por formar parte de un sueño que llegó a su cumplimiento.

*Blanca Nohely Silva Cartuche*

## DEDICATORIA

*A Dios, por ser el motor de mi vida para seguir adelante cumpliendo cada uno de mis sueños, gracias a él, cada día ha sido una razón por que luchar y un motivo para nunca rendirme a pesar de las muchas pruebas con las que nos encontramos en la vida. Para Dios sea el éxito, porque es inevitable no darle el mayor honor a quien lo hace posible todo.*

*A mis padres, Lucio Silva (+), Victoria Cartuche quienes han sido mi soporte durante toda mi vida, brindando su amor, apoyo y dedicación, para que lograra cumplir todos mis sueños y metas, a mis hermanos, fuente de sabiduría, perseverancia y mi ejemplo a seguir siempre. Este logro no sería lo mismo sin ustedes, gracias totales*

*También, este triunfo le dedico a mi pequeña familia e hija Danna Victoria, que se convirtió en mi motor y motivo de superación, gracias por su constante motivación y palabras de aliento que no me dejaban decaer para seguir adelante con mis metas.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Cambio de uso del suelo.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Efectos del cambio y uso de Suelo .....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. La Deforestación.....</b>	<b>4</b>
2.3.1. Deforestación en el Mundo.....	5
2.3.2. La Deforestación en Ecuador .....	5
2.3.3. Causas de la Deforestación.....	6
2.3.4. Tasa de Deforestación .....	6
<b>2.4. Teledetección y Sistemas de información geográfica (SIG).....</b>	<b>7</b>
2.4.1. Elementos de teledetección .....	8
2.4.2. Imágenes Satelitales .....	8
2.4.3. Satélites Landsat .....	9
2.4.3.1. Landsat 5 .....	9
2.4.3.2. Landsat 8 .....	10
<b>2.5. Resolución de un sistema Sensor.....</b>	<b>11</b>
2.5.1. Resolución espacial.....	11
2.5.2. Resolución espectral .....	11
2.5.3. Resolución radiométrica.....	12
<b>2.6. Procesamiento de imágenes satelitales .....</b>	<b>12</b>
2.6.1. Corrección de Imágenes .....	12
2.6.1.1. Corrección Radiométrica.....	13
2.6.1.2. Corrección geométrica .....	13

2.6.1.3.	Corrección atmosférica .....	14
<b>2.7.</b>	<b>Sensores Remotos .....</b>	<b>14</b>
2.7.1.	Sensores pasivos .....	14
2.7.2.	Sensores activos.....	14
<b>2.8.</b>	<b>Clasificación de imágenes satelitales.....</b>	<b>15</b>
2.8.1.	Clasificación no supervisada .....	15
2.8.2.	Clasificación supervisada .....	16
<b>2.9.</b>	<b>Análisis Multitemporal .....</b>	<b>16</b>
2.9.1.	Metodologías de Modelos de Cambios de uso del suelo .....	16
2.9.2.	GEOMOD .....	17
2.9.3.	Análisis de cadenas de Markov .....	17
2.9.4.	Modelador de Cambios en el Terreno (LCM).....	18
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.</b>	<b>Área de estudio .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2.</b>	<b>Base de Datos .....</b>	<b>20</b>
3.2.1.	Software .....	20
<b>3.3.</b>	<b>Métodos.....</b>	<b>20</b>
3.3.1.	Desarrollo Metodológico .....	23
3.3.2.	Pre-procesamiento de imágenes satelitales .....	23
3.3.3.	Procesamiento de imágenes.....	25
3.3.3.1.	Composición de color .....	25
3.3.3.2.	Identificación de sitios de entrenamiento.....	26
3.3.3.3.	Clasificación Supervisada .....	27
3.3.4.	Metodología para objetivo dos: Analizar el cambio de uso del suelo (1986-2000 y 2000-	

2018)	29
3.3.4.1. Análisis del cambio de uso del suelo 1986-2018.....	29
3.3.5. Metodología para objetivo 3 tres: Generar escenarios de cambio del uso del suelo al año 2050	31
3.3.5.1. Generación de escenarios futuros de Deforestación al año 2050.....	31
3.3.5.2. Variables explicativas .....	32
3.3.5.3. Potenciales de transición .....	32
3.3.5.4. Predicciones del cambio de uso del suelo .....	33
3.3.3.4. Calibración y validación del modelo .....	34
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
4.1. Área de uso y cobertura de suelo .....	35
4.2. Cambios de uso del suelo en los periodos 1986-2000 y 2000-2018.....	41
4.2.1. Análisis del cambio y uso del suelo en el periodo 1986-2000 .....	41
4.2.2. Análisis del cambio y uso del suelo en el periodo 2000-2018 .....	43
<b>4.3. Modelamiento de escenarios de cambio de uso del suelo al año 2050.....</b>	<b>49</b>
4.3.1. Escenario proyectado versus real de uso del suelo al 2018.....	49
4.3.2. Escenarios de deforestación al 2050 .....	51
<b>5. DISCUSIÓN.....</b>	<b>54</b>
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>61</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>73</b>

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Imágenes Utilizadas .....	23
<b>Tabla 2.</b> Clases de cobertura .....	27
<b>Tabla 3.</b> Cobertura y uso del suelo en los años 1986, 2000 y 2018.....	35
<b>Tabla 4.</b> Deforestación anual y tasa de deforestación periodo 1986-2000 .....	40
<b>Tabla 5.</b> Deforestación anual y tasa de deforestación periodo 2000-2018 .....	40
<b>Tabla 6.</b> Comparación del Uso y cobertura del suelo real y proyectado del año 2018.....	49
<b>Tabla 7.</b> Tabulación cruzada de píxeles 1986-2000 .....	73
<b>Tabla 8.</b> Tabulación cruzada proporcional .....	73
<b>Tabla 9.</b> Tabulación cruzada de píxeles 2000-2018 .....	74
<b>Tabla 10.</b> Tabulación cruzada proporcional .....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de Ubicación del área de estudios.....	19
<b>Figura 2.</b> Flujograma metodológico .....	22
<b>Figura 3.</b> Módulo para realizar corrección geométrica .....	24
<b>Figura 4.</b> Módulo para realizar corrección atmosférica.....	25
<b>Figura 5.</b> Módulo Create color composite .....	26
<b>Figura 6.</b> Módulo Digitalize.....	26
<b>Figura 7.</b> Interfaz de cambios de uso del suelo dentro del LCM .....	30
<b>Figura 8.</b> Evaluación de las áreas potenciales de transición .....	33
<b>Figura 9.</b> Componentes básicos de un mapa 1986 .....	37
<b>Figura 10.</b> Componentes básicos de un mapa 2000 .....	38
<b>Figura 11.</b> Componentes básicos de un mapa 2018 .....	39
<b>Figura 12.</b> Ganancias y pérdidas en el periodo 1986-2000.....	41
<b>Figura 13.</b> Cambio neto periodo 1986-2000.....	42
<b>Figura 14.</b> Contribución al cambio neto periodo 1986-2000.....	43
<b>Figura 15.</b> Ganancias y pérdidas en 2000-2018 .....	43
<b>Figura 16.</b> Cambio neto en 2000-2018 .....	44
<b>Figura 17.</b> Contribución al cambio neto en 2000-2018.....	45
<b>Figura 18.</b> Mapa de cambios 1986-2000 .....	46
<b>Figura 19.</b> Mapa de cambios 2000-2018 .....	47
<b>Figura 20.</b> Mapa de tendencia de cambio .....	48
<b>Figura 21.</b> Mapa de validación del modelo de deforestación.....	50
<b>Figura 22.</b> Tendencia de deforestación del periodo 1986-2050.....	51
<b>Figura 23.</b> Mapa de uso del suelo 2050.....	52
<b>Figura 24.</b> Mapa de riesgo de deforestación 2050 .....	53
<b>Figura 25.</b> Mapa de relación real vs proyectado .....	75
<b>Figura 26.</b> Variables explicativas .....	75
<b>Figura 27.</b> Mapas de uso del suelo 2020-2025 .....	75
<b>Figura 28.</b> Mapas de uso del suelo 2030-2045 .....	75
<b>Figura 29.</b> Mapas de uso del suelo 2040-2045 .....	75

**Figura 30.** Predicciones futuras al 2050 .....75  
**Figura 31.** Fotografías RBCP .....7

**“PREDICCIONES DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO, EN  
EL PERIODO 1986-2050 EN LA RESERVA BIOLÓGICA CERRO  
PLATEADO, PARROQUIA NUEVO PARAÍSO, PROVINCIA DE  
ZAMORA CHINCHIPE”**

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo predecir los cambios de uso del suelo al año 2050 en la Reserva Biológica Cerro Plateado, ubicada en la parroquia Nuevo Paraíso, provincia de Zamora Chinchipe. Por medio de técnicas de interpretación de imágenes LANDSAT 5-7 -8, SENTINEL2, se realizó la clasificación supervisada de los años 1986, 2000 y 2018. Además, se utilizó el módulo Land Change Modeler (LCM) del software TerrSet para determinar las pérdidas, ganancias, cambios netos de distintas coberturas y posteriormente se calculó la tasa de deforestación. Finalmente, se obtuvieron los escenarios futuros de deforestación a través del software Terrset y la aplicación de variables explicativas tales como: modelo de elevación digital, distancia de vías, ríos y poblados. En los 32 años de estudios los resultados indicaron que el principal cambio de uso del suelo estuvo determinado por la conversión de bosque a pasto, puesto que para el primer periodo 1986-2000 la tasa de deforestación fue de 0,057% y para el segundo periodo 2000-2018 fue de 0,13%. Así mismo la tasa de deforestación estimada para el año 2050 reportó un 0,43%, lo cual indica una tendencia de deforestación cada vez mayor. En conclusión, el mayor cambio de bosque se observó en el segundo periodo, donde existió mayor intervención antrópica; sin embargo, el continuo aumento de deforestación ponen en riesgo la conservación de bosques y por esta razón se recomienda realizar el monitoreo de la deforestación con satélites Landsat.

**Palabras clave:** Predicciones, Landsat, cambio de uso del suelo, Land Change Modeler.

## Summary

The purpose of this study was to Prediction changes in land use by 2050 in the Cerro Plateado Biological Reserve, located in the new Paraíso parish of Zamora Chinchipe province, it is considered one of the areas with high concentration of biodiversity in southern Ecuador. The supervised classification of 1986, 2000 and 2018 years was obtained by the interpretation techniques of Landsat-5-7-8 and Sentinel-2 satellite images; in addition the Land Change Modeler (LCM) module of the TerrSet software was used to determine the losses, gains, net change of the different hedges and subsequently the deforestation rate. Finally, they were obtained the deforestation future scenarios were obtained through TerrSet software and the application of explanatory variables such as: digital elevation model, distance from roads, rivers and villages. During the 32 years of study, the main land use change was determined by the conversion from forest to grass, since for the first period 1986-2000 the deforestation rate was 0.057% and for the second period 2000-2018 was 0.13%. This depletion is due to the expansion of agricultural land, population growth and the construction of access roads which are considered the main sources of this change. For 2050, the estimated deforestation rate is 0.43%, which indicate an increasing deforestation trend. To sum up, the largest forest change was observed in the second period, where there was more anthropic intervention; however, the continued increase in deforestation put forest conservation at risk, for this reason deforestation monitoring with Landsat satellites is recommended.

**Keywords:** Predictions, Landsat, land use change, Land Change Modeler

## 1. INTRODUCCIÓN

En la tierra los bosques tropicales poseen diversidad biológica y cultural (Finer, Jenkis, Pimm, Keane y Ross, 2008), los mismos que nos brindan recursos y servicios, entre ellos se encuentra la regulación del clima mediante el almacenamiento de carbono (Scharlemann *et al.*, 2015; Pan *et al.*, 2016). Por otro lado estos servicios ecosistemas se encuentran bajo presión debido a que la mayor parte de los bosques montanos han sido talados especialmente en Ecuador, Perú y Colombia, y muchos de los remanentes continuos que se mantienen hoy en día están localizados dentro de áreas protegidas. Estos bosques han recibido baja atención a nivel científico pese a su alto valor económico y ecológico. (Pohle y Gerique 2018).

Según FAO (2016a) menciona que la superficie forestal mundial en el periodo de 1990-2015 ha disminuido 129 millones de hectáreas por tal motivo es de vital importancia destacar dicho ámbito. La transformación de ecosistemas naturales en América Latina también es alarmante, la misma que representa alrededor de 600 millones de hectáreas (Armenteras, González, Retana y Espelta, 2016; FAO, 2017). Se estima que en el periodo de 1990 y 2016 en Ecuador se han perdido cerca de 2 millones de hectáreas de bosque natural (MAE, 2017). La deforestación sigue distintos patrones según sea su región, condiciones biofísicas y esencialmente la expansión agropecuaria (MAE, 2016; Sierra, 2013). El establecimiento de Áreas protegidas son políticas que se han implementado con el fin de mitigar la deforestación y la degradación ambiental (Van Der Hoek, 2017).

Estudios anteriores señalan que los bosques nativos en la RAE han sido afectados y fragmentados principalmente por la expansión agropecuaria (Sierra, 2013; Alvarado, 2015; Jaramillo y Antunes, 2018). Datos recientes muestran una tendencia de la rápida deforestación en esta región, alcanzando más de 27 000 ha/año de deforestación entre 2014 y 2016 (MAE, 2017). En la Reserva Biológica Cerro Plateado, perteneciente a la parroquia Nuevo Paraíso, provincia de Zamora Chinchipe, se ha evidenciado problemas actuales tales como: la deforestación, expansión de la frontera agrícola, colonización de tierras vacías y construcción de vías producto del desarrollo

social lo que ocasiona que las tasas de deforestación se incrementen sin medida poniendo en riesgo la Reserva Biológica Cerro Plateado (PDOT NUEVO PARAÍSO, 2008).

Debido a que en la zona de estudio existen diversas actividades antrópicas que generan el cambio de uso de suelo, se cree conveniente realizar esta investigación, en donde se considera de gran importancia la percepción remota que puede contribuir a nuevos descubrimientos transformando las ciencias de la tierra y abriendo nuevas corrientes de investigación, generando importantes beneficios para la sociedad tales como: La detección y monitoreo de los cambios en la cobertura terrestre (Barrantes *et al.* 2010).

Esta investigación pretende predecir los cambios de uso del suelo y modelar los escenarios futuros de deforestación, tomando como herramienta el Modelador de Cambios en el Terreno (LCM), de TerrSet; en el cual se utilizará imágenes de cobertura vegetal de dos periodos diferentes (1986-2000) (2000-2018), para contrastar información de los dos periodos y observar los cambios que se dan en los mismos y las actividades que se han venido desarrollando en esta zona, mediante variables explicativas (modelo digital de terreno - DEM, evidencia del cambio, distancia a áreas de cambios, distancia a manzanas).

El presente proyecto se desarrolló dando cumplimiento a los siguientes objetivos:

### **General**

- Predecir los cambios en el uso del suelo en el periodo 1986-2050 en la Reserva Biológica Cerro Plateado, parroquia Nuevo Paraíso, provincia de Zamora Chinchipe.

### **Específicos**

- Realizar la clasificación de imágenes satelitales comprendidas en los periodos (1986-2000 2000-2018) utilizando los sensores del satélite LANDSAT 5-7 -8, SENTINEL2
- Analizar el cambio de uso del suelo de los periodos 1986-2000 y 2000-2018
- Generar escenarios de cambio de uso del suelo al año 2050

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

El presente capítulo se desarrolla los conceptos generales, lo cual permite tener conocimiento actualizado y un soporte teórico-científico.

### **2.1. Cambio de uso del suelo**

Según Parveen *et al.* (2018), menciona que el suelo es el lugar donde se realizan todas las actividades humanas, y a su vez es el uso de los recursos que el suelo brinda, por parte de las personas, lo que da lugar al término "uso del suelo"; que se modifica con los propósitos a los que sirve, ya sea producción, provisión, recreación, extracción de materiales, etc. Por lo tanto, el uso del suelo se localiza bajo la influencia de las necesidades humanas y las características ambientales y sus procesos (Parveen, *et al.*, 2018).

También estos cambios son aquellos que ocasionan el deterioro de la biodiversidad y ponen en peligro el manejo adecuado de los sistemas ecológicos existentes en el país, y la correcta elaboración e implementación de políticas territoriales. A esto se agrega el contexto en el que se desarrollan estas transformaciones, que tiene cierta complejidad y provoca generalmente otros cambios imprevistos en el funcionamiento del ambiente y su estructura, con lo que se plantean nuevos riesgos para la sostenibilidad futura de los recursos (Pinos, 2017).

Entre los años 50 y finales de los 90, en Ecuador se produjo un cambio en la expansión de la frontera agrícola y uso del suelo, el mismo que radicó en la conservación de formas de producción diversificadas. Por ende, se considera que los principales factores para el cambio del uso de suelo en el país son: la deforestación, ganadería, expansión de la frontera agrícola y el incremento de áreas urbanas sin su correcta planificación (MAE, 2015a). De la misma forma Sierra (2013) menciona que el aumento de la tierra agropecuaria es el principal factor para el cambio de uso de suelo en el país y se evidencia que durante el periodo 1990-2010 la productividad agropecuaria ascendió de una forma continua.

## **2.2. Efectos del cambio y uso de Suelo**

Existen ciertos factores importantes que ejercen presión sobre la biodiversidad y sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, potenciando procesos que deterioran la fertilidad del suelo, de la calidad del agua y la pérdida del hábitat, por consiguiente afecta la provisión de bienes y servicios ambientales, trayendo consigo una pérdida de conectividad hidrológica (Escalona, Peña, Pincheira, y Rebolledo, 2011).

Por otro lado, Acevedo y Delibes (2013) señalan que los cambios de uso y cobertura del suelo tienen diferentes efectos sobre el medio ambiente tales como:

- Intensiva reducción de espacios con vegetación natural incluyendo terrenos de cultivo, áreas naturales y humedales.
- Degradación del suelo por procesos erosivos
- Transformación del paisaje provocando el aumento de la fragmentación y disminuyendo la conectividad entre ecosistemas.
- Pérdida de la biodiversidad, reducción y desaparecimiento de hábitats, corredores ecológicos y parches de vida silvestre.
- Cambios en el ciclo hidrológico.

## **2.3. La Deforestación**

De acuerdo a la FAO la deforestación implica una reducción de la cubierta de copas hasta menos del 10 por ciento o bien, un cambio de uso de las tierras.

La deforestación se refiere principalmente a la conversión directa, la misma que ha sido inducida por el hombre de tierras forestales a no forestales (United Nations, 1992). Un concepto generado de deforestación se menciona; “Implica la pérdida permanente de la cubierta de bosque e implica la transformación en otro uso de la tierra, dicha perdida puede ser causada y mantenida

por inducción humana o perturbación natural. La deforestación envuelve áreas de bosque convertidas a la agricultura, pasto, reservas de aguas y áreas urbanas”. (FAO, 2001).

### **2.3.1. Deforestación en el Mundo**

El fenómeno deforestación no es nuevo para la humanidad, se conoce que en los tres últimos siglos el promedio fue de 6 millones de hectáreas anuales y se dio concentradamente en el Hemisferio Norte, principalmente en los siglos XVIII y XIX. en la actualidad a la deforestación se la mide como perdida de superficie, la misma que ha aumentado de forma significativa sino que, además, ha dejado de ser patrimonio del Hemisferio Norte como fue durante los tres últimos siglos, la misma que se ha concentrado en el Hemisferio Sur. Este hecho debe llamarnos seriamente a la reflexión. (Montenegro *et al.*, 2014).

La superficie forestal a nivel mundial ha experimentado una disminución de 129 millones de hectáreas con un porcentaje de (3,1%) en el periodo entre (1990-2015) y en la actualidad se encuentra por debajo de los 4000 millones de hectáreas, por lo que se dice que la deforestación es el principal motivo y en América del Sur se produce la mayor pérdida de bosque. La agricultura comercial a gran escala es responsable del 40% de la deforestación en a zonas tropicales y subtropicales, expansión urbana, infraestructura y minería del 27% (FAO, 2016a).

### **2.3.2. La Deforestación en Ecuador**

En Ecuador de manera general es difícil realizar una cuantificación exacta de la deforestación, por varios factores que la producen y a la complejidad de las diversas regiones del país. En el periodo de 1990-2000 el último informe de las Estadísticas del patrimonio Natural indica que la deforestación anual fue de 92 742 ha/año, con una tasa anual promedio de - 0,65 %, del mismo modo, para el período 2000-2008 la deforestación neta anual fue de 77 748 ha/año, con una tasa de -0,58%, y para el período 2008-2014 la deforestación neta anual fue de 47 497 ha/año, con una tasa anual de -0,37% (MAE, 2015). Asimismo, el informe de Deforestación del Ecuador Continental señala que a partir del año 2000 los bosques toleraron mayores pérdidas, ya que en el año 1990 se evidenciaba una superficie de bosque nativo de 14 587 771 hectáreas, mientras que

para el año 2016 esta superficie decayó drásticamente a 12 631 198 de hectáreas de bosque nativo, de las cuales el 74% se encuentran en la región amazónica (MAE, 2017).

### **2.3.3. Causas de la Deforestación**

Las causas de la deforestación pueden ser inmediatas (directas) o subyacentes (indirectas) (Kaimovitz y Angelsen, 2001; Kissinger, Herold y De Sy, 2012). Los principios inmediatos de la deforestación son las actividades humanas con repercusiones directas en la cubierta forestal, tales como, la expansión agrícola, el crecimiento urbano, el desarrollo de la infraestructura y la minería. Aunque la extracción de madera de forma insostenible, incluida la extracción ilegal, se considera en ocasiones una causa de deforestación, esta se asocia más a menudo a la degradación de bosques, ya que la extracción de madera no conlleva necesariamente cambios en el uso de la tierra. Las causas subyacentes de la deforestación están relacionadas con las interacciones a nivel macro de los factores de carácter demográfico, económico, tecnológico, social, cultural y político (Kissinger, Herold y De Sy, 2012: Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005), que puedan ejercer su influencia a cierta distancia de los bosques que se ven afectados por ellos.

Las causas de la deforestación varían de acuerdo a las potencias del mercado global y se dice que son de tipo móvil (Lambin y Meyfroidt 2011). Actualmente los cambios de políticas y ciclos económicos asociados a la tenencia de la tierra están cambiando los agentes de la deforestación, aumentando en algunos países el impacto de los pequeños y medianos agricultores (Killeen *et al.*, 2008). A partir de la década de los ochenta y los noventa, el establecimiento de pastizales es el factor de cambio más frecuente en América del Sur (Sierra, 2000; Rudel *et al.*, 2009).

### **2.3.4. Tasa de Deforestación**

Mide el cambio anual de cobertura boscosa debido a la conversión y transformación de ecosistemas naturales a usos y cobertura del suelo antrópicos.

$$R = \frac{A_1 - A_2}{t_2 - t_1}$$

**Donde:**

**R:** Deforestación total anual promedio para un período determinado

**A1:** Área de bosque inicial (ha)

**A2:** Área de bosque final (ha)

**t1:** Año inicial

**t2:** Año final

**2.4. Teledetección y Sistemas de información geográfica (SIG)**

La teledetección constituyen instrumentos que se utilizan para obtener y procesar información sobre el manejo del suelo en zonas que las personas no tienen acceso, la misma que aporta para la correcta toma de decisiones para una mejor planificación en el territorio de los recursos naturales (Lao y Peláez, 2018).

La teledetección está incorporada a representaciones de los tipos de coberturas del suelo. Esta perspectiva tiene un impacto importante en investigaciones ecológicas ya que mejora la caracterización de la heterogeneidad del paisaje y permite describir patrones espaciales. Además contribuye tanto al conocimiento de los procesos ecológicos como a la resolución de problemas de manejo y conservación (Cabello & Parruelo, 2008).

Los Sistemas de información geográfica son una herramienta que añade un valor a la información y puede ser comparada de forma simultánea entre un sistema de información y un sistema de apoyo al momento de tomar decisiones (Sendra, 1994), mientras que CEPAL (1991) interpreta al SIG como un conjunto de elementos (personas, hardware y software) instituidos con la capacidad de ingresar, almacenar, administrar, analizar, transmitir y comunicar datos georreferenciados (referenciados geográficamente por coordenadas de latitud y longitud), cuya función principal es el proceso de información relativa al espacio, dándole forma dos elementos básicos como son: el soporte técnico de los equipos (hardware) y por el otro, el soporte lógico del manejo de la información.

### **2.4.1. Elementos de teledetección**

Un sistema de teledetección espacial incluye los siguiente elementos (Chuvienco E., Fundamentos de Teledetección Espacial, 2002)

- Fuente de energía, la cual supone es el inicio de la radiación electromagnética que el sensor es capaz de detectar. La fuente de energía más importante es el sol.
- Cubierta terrestre, la misma que está confirmada por diferentes masas vegetales, suelos, agua o infraestructura dichos elementos reciben la señal energética.
- Sistema de recepción, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma y es transmitida por una plataforma siendo esta almacenada en un formato apropiado.
- Interprete, aquel que transforma los datos en información temática de interés, ya sea de forma visual o digitalmente.
- Usuario final, encargado del análisis de dicho documento producto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que se deriven.

### **2.4.2. Imágenes Satelitales**

El procesamiento de imágenes implica una serie de logaritmos matemáticos, estadísticos y computacionales, que ayuda a mejorar, corregir, extraer y analizar la información de las imágenes captadas por los sensores de los satélites. El procesamiento digital ayuda a realizar operaciones complejas, muy costosas o inaccesibles para el análisis visual. Permite una rápida comparación de fenómenos Multitemporales por la accesibilidad a la información que posee (Chuvienco, 2009).

Es el resultado que se obtiene del capturar la radiación emitida o reflejada por la superficie de la tierra mediante un sensor colocado a bordo de un satélite artificial. Los diferentes tipos de imágenes satelitales poseen varias características como colores, resolución, elevación etc. En si la calidad de la fotografía tomada depende del instrumento utilizado y de la altitud (Sánchez, 2012).

Cuando la imagen a cubrir es extensa el procesamiento es bastante largo por lo que se considera que como desventaja, además la imagen depende notablemente de la calidad de sensor que se esté utilizando, la imagen siempre se ve influenciada por las condiciones meteorológicas al momento de realizar la toma (Sánchez, 2012).

### 2.4.3. Satélites Landsat

Son satélites que nos permiten monitorear recursos terrestres fue la primera misión de este tipo que emprendieron los Estados Unidos. LANDSAT está conformado por 7 satélites de los cuales 5 y 7 están en funcionamiento, el mismo que esta administrado por la NASA y la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

La plataforma Landsat con el paso de los años fue incluyendo la manera de captar más información de la superficie terrestre, con el fin de obtener mayor precisión y detalle, mejorando la radiometría, geometría y especialmente sensores pasivos, tales como: Thematic Mapper (TM) con mayor sensibilidad radiométrica, y el Enhanced Thematic Mapper Plus (TM+) el cual destaca por su banda con resolución de 15 metros (Pancromática) (Chander, Markham y Helder, 2009).

#### 2.4.3.1. Landsat 5

El 1° de marzo fue 1985 fue puesto en marcha llevando el sensor MMSS y TM (Mapeador Temático) con captura de datos en 7 bandas diferentes, pertenece al programa Landsat el mismo que está financiado por el gobierno de los Estados Unidos y operado por la NASA (USGS, 2018).

Por otro lado Chander *et al.* (2007) menciona las características de las bandas de Landsat 5 tales como:

- **Banda 1:** (0,45 a 0,52 micrones - azul) Diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación.
- **Banda 2:** (0,52 a 0,60 micrones - verde -) Especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde.

- **Banda 3:** (0,63 a 0,69 micrones - rojo -) Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal.
- **Banda 4:** (0,76 a 0,90 micrones - infrarrojo cercano -) Es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.
- **Banda 5:** (1,55 a 1,75 micrones - infrarrojo medio -) Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo.
- **Banda 6:** (10,40 a 12,50 micrones - infrarrojo termal -) El infrarrojo termal es útil en el análisis del stress de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y en el mapeo termal.
- **Banda 7:** (2,08 a 2,35 micrones - infrarrojo medio -) Especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para el mapeo hidrotermal. Mide la cantidad de hidróxilos (OH) y la absorción de agua.

#### 2.4.3.2. *Landsat 8*

Los sensores proporcionan un rendimiento radiométrico muy bueno debido a que mejoran la señal a ruido (SNR) cuantificado en un rango dinámico de 12 bits (se transcribe en 4 096 niveles de gris potenciales en una imagen en comparación con solo 256 niveles de gris en instrumentos de 8 bits anteriores). Los productos se entregan como imágenes de 16 bits (escaladas a 55 000 niveles de gris) (USGS, 2018).

Este satélite fue lanzado el 11 de febrero de 2013, estas imágenes constan de nueve bandas con una resolución de 30 metros en la banda 1,7 y 9 (IGAC, 2013). Las bandas OLI poseen bandas adicionales: un canal visible azul profundo (banda 1) creado para recursos hídricos e investigación de zonas costeras y un nuevo canal infrarrojo de onda corta (banda 9) para la detección de nubes de cirro (USGS, 2018). La resolución de la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Bandas térmicas 10 y 11 son ventajosas para aportar temperaturas de la superficie más precisa y se

acumulan a 100 metros. El tamaño aproximado es de 170 km escena de norte a sur por 183 km de este a oeste (IGAC, 2013).

## **2.5. Resolución de un sistema Sensor**

Chuvieco (2009), señala que esta resolución es discriminar información a detalle, de esta forma Consta en un parámetro principal que define las propiedades de un sistema de teledetección y establece el nivel de precisión de los productos que el sistema genera; la resolución depende del sensor y de la plataforma, incluye al menos cuatro tipos de resoluciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal (Olaya, 2014).

### **2.5.1. Resolución espacial**

Se refiere al tamaño del objeto o característica del terreno de menor tamaño que se puede diferenciar en una imagen. Es una de las características más importantes que hay que tener en cuenta al momento de adquirir imágenes, porque determina de forma directa qué rasgos del terreno pueden cartografiarse. Para el usuario es de suma importante comprender que, a medida que mejora la resolución espacial, el tamaño de los archivos digitales incrementa de forma espectacular (Rashed y Juergens, 2010).

Es el equivalente al tamaño de píxel, es decir, a la dimensión real que un píxel de la imagen tiene sobre el terreno y está en función de la capacidad resolutive del sensor y las características de la plataforma tales como la altura a la que se sitúa (Olaya, 2014).

### **2.5.2. Resolución espectral**

Labrador *et al.* (2016), señalan que la resolución espectral comprende el ancho y cantidad de bandas espectrales que se pueden diferenciar dentro de un sensor remoto. Cuanta más bandas incluya un sensor mejor, puesto que cada banda constituye una variable para caracterizar la superficie captada (Pacheco, Valle, Delrieux y Bianchi, 2014).

Así mismo el número de bandas se utiliza para explicar cómo mide el sistema la reflectancia de varias longitudes de ondas distintas. Por ejemplo, un sensor multiespectral de cuatro bandas mide la energía en cuatro longitudes de onda diferentes. Hay que tener en cuenta, que una imagen sólo puede crearse adicionando los tres colores fundamentales (rojo, verde y azul) (Pacheco, Valle, Delrieux y Bianchi, 2014).

### **2.5.3. Resolución radiométrica**

Representa el total mínimo de energía necesaria para aumentar el valor del pixel dentro de un conjunto de niveles digitales (ND). Se refiere al nivel de cuantificación en el que las mediciones de radiancia analógicas se digitalizan y almacenan como valores de los niveles digitales (ND), utilizados para expresar los datos recogidos por el sensor (Rashed y Juergens, 2010).

## **2.6. Procesamiento de imágenes satelitales**

Según Pacheco *et al* (2014) menciona que, el procesamiento de la imagen ha logrado un gran alcance debido a la variedad de utilidades científicas y tecnológicas que aporta el análisis espacial del territorio, donde se pueden aplicar de forma directa o indirecta en distintos entornos. Consiste en el análisis de las imágenes satelitales, en lo que principalmente se refiere al proceso de extraer la información que se encuentra almacenada dentro de los ND en cada imagen (Silva, Arévalo y Herrera, 2010).

Las principales técnicas aplicadas para el procesamiento de la imagen satelital se distribuye en tres fases que son: 1. la corrección utilizada esencialmente para coger las fallas mostradas en la distorsión manifestada en los datos que se producen al momento de realizar lama; 2. mejoramiento y 3. Extracción de la información resultante sobre los datos generados (Charlotte *et al.*, 2016).

### **2.6.1. Corrección de Imágenes**

Son una serie de operaciones que están destinadas básicamente a mejorar las propiedades radiométricas y geométricas de la imagen, por ende elimina los errores producidos en la adquisición de las imágenes de satélite. El proceso posee ciertos errores potenciales, tales como:

distorsiones creadas por la atmósfera, problemas causadas por el funcionamiento del sensor, distorsiones ocasionadas por la rotación de la Tierra, errores en la plataforma del sensor (Chuvieco, 2009). la corrección en si trata que el pre procesamiento de las imágenes satelitales o fase preparatoria mejore la calidad de la imagen como base para análisis posteriores (Olaya, 2014).

#### **2.6.1.1. Corrección Radiométrica**

Con esta corrección se pretende adquirir la máxima correlación entre la señal registrada y las diferentes características de la superficie observada, especialmente el efecto que se modifica es la dispersión que ocasiona un aumento de la radiación revelada por el sensor y puesto que la dispersión no es constante en el tiempo ni en el espacio las correcciones serán aproximadas (Campbell y Wynne, 2011).

Por otro lado estas correcciones se realizan por la compañía que provee la imagen y radican en eliminar distorsiones en la imagen debidas al sensor, el efecto de la topografía o el efecto de la atmósfera y la conversión de la energía registrada por el sensor a valores digitales (conversión analógica-digital). En los sensores modernos se ejecuta calibración de los detectores (energía medida VS energía reflejada o emitida por un cuerpo de referencia) para asegurarse que operen correctamente (Aguilar *et al.*, 2015).

#### **2.6.1.2. Corrección geométrica**

Radica en realizar una relación entre las curvas de nivel de la zona de estudio mediante archivos de vector (Shapefiles), cuya finalidad es establecer las falencias en las imágenes, empleando el software específico, que consiente en abrir los dos archivos en conjunto (Jerves y Machado, 2015), por otro lado (Zeballos *et al.*, 2014) menciona que para llevar a cabo la corrección geométrica se selecciona la mejor imagen, tomando en cuenta que presente las mejores condiciones geométricas, de acuerdo a esta se modifican las siguientes imágenes satelitales en un ámbito geométrico, mediante la examinación Multitemporal.

### **2.6.1.3. Corrección atmosférica**

El objetivo de esta corrección radica en eliminar el efecto aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmósfera; con este proceso se logra mejorar la calidad visual de la imagen; así como, eliminar el componente intrusivo de la atmósfera (Aguilar, Mora y Vargas, 2015) de acuerdo a (Corrales y Ochoa, 2017), este método se lo utiliza fundamentalmente para determinar el nivel de reflejos sin perturbación como un mecanismo alternativo a la técnica radiométrica, para su aplicación se usa generalmente algoritmos que corren dentro de un software libre, lo que permite establecer las correcciones de dispersión molecular generadas por algunos componentes atmosféricos que tienen un tamaño menor al de la onda de radiación electromagnética.

## **2.7. Sensores Remotos**

Según Puerta *et al.* (2013), es la herramienta que se lo encuentra en la plataforma satelital capaz de captar la energía que procede de la cubierta terrestre. Estos sensores remotos están clasificados como pasivos y activos, según el tipo de fuentes de energía electromagnética que utilice (Chuvieco, 2009).

### **2.7.1. Sensores pasivos**

Estos sensores captan la radiación electromagnética emitida o reflejada de fuentes naturales, poseen sensibilidad multispectral, es decir recogen datos de diferentes bandas espectrales. Por ejemplo, la radiación ultravioleta se utiliza para monitorizar los niveles de ozono en las capas altas de la atmósfera. Las bandas visible e infrarrojas permiten determinar la salud de la cubierta vegetal (cultivos, bosques). Los captadores sensibles a la radiación infrarroja térmica sirven para determinar la temperatura del suelo, de las nubes, y de la superficie de los mares ampliamente (Lillesand *et al.*, 2015).

### **2.7.2. Sensores activos**

Por otra parte estos sensores los sensores cuentan con fuentes internas que generan artificialmente la radiación, la misma que rebota en un objeto y miden las características de la señal

reflejada, los cuales son capaces de iluminar un objeto con su propia fuente de radiación, los sensores activos son usados frecuentemente cuando la radiación natural en una banda particular del espectro no es suficiente para iluminar correctamente al objeto, esto es la radiación natural está por debajo del umbral de la señal para ruido. (Martinez y Díaz, 2005)

El uso de longitudes de onda mayores, que no se encuentran en los espectros solar o terrestre, implica la necesidad de utilizar sensores activos, es decir aquellos que generan su propio flujo de radiación (Martinez y Díaz, 2005).

## **2.8. Clasificación de imágenes satelitales**

El objetivo principal es designar píxeles a las clases, las cuales deben ser espectralmente más similares entre sí que a los píxeles en otras clases (Campbell y Wynne, 2011). Existen dos tipos de clasificación de imágenes: 1) clasificación supervisada y 2) clasificación no supervisada.

Estos algoritmos de clasificación digital utilizan la reflectancia de cada píxel en diferentes longitudes de onda y un criterio estadístico para asignarlo a una clase espectral (bosque, pasto, urbano, etc.). Existen varios procedimientos para la clasificación de imágenes, a continuación se indicara las más comunes.

### **2.8.1. Clasificación no supervisada**

Galindo *et al* (2014), menciona que por lo general este tipo de clasificación se usa cuando se conoce poco sobre los datos antes del proceso de clasificación y se tiende a obtener el número de clases posibles, para luego ser examinadas y reagrupadas para comprimir el número final de clases. En este caso el algoritmo de clasificación decide a cual clase de información (pasto, bosque, cultivo, etc.) asigna cada píxel.

Por otro lado esta clasificación está en condición de ofrecer una información subjetiva, basándose en la realidad del área de estudio. Tanto en la clasificación supervisada como la no

supervisada, las poblaciones de píxeles de las diferentes categorías deben tener caracteres espectrales homogéneos (Chuvieco, 2009).

### **2.8.2. Clasificación supervisada**

Chuvieco (2009), señala que la clasificación supervisada parte de un cierto conocimiento de la zona de investigación, permite delimitar sobre la imagen unas áreas suficientemente representativas de cada una de las categorías que componen. El analista define las áreas de entrenamiento, para cada categoría mediante la identificación de regiones en la imagen. Dichas áreas deben incorporar las propiedades espectrales de las categorías que representan, deben ser homogéneas; las áreas de entrenamiento no deberían incluir regiones inusuales, tampoco incluir límites entre categorías. Los píxeles ubicados dentro de estas áreas forman las muestras de entrenamiento utilizadas para guiar el algoritmo de clasificación (Lillesand *et al.*, 2014).

## **2.9. Análisis Multitemporal**

Este proceso consiste en evaluar comparativamente dos o más imágenes de la misma zona pero de fechas diferentes (Chuvieco 1990). La observación cíclica o periódica permite el seguimiento de los diferentes procesos que intervienen en una cobertura de bosque como: deforestación, regeneración, cambios de usos de suelo, áreas cultivadas, incendios, plantaciones, etc. La información que se obtiene de un análisis multitemporal permite hacer dicha evaluación de la magnitud de los cambios, examinar los actores principales en los procesos de cambios y suministrar información para modificar los problemas de una forma oportuna, en caso de ser necesario (Chuvieco, 1996).

### **2.9.1. Metodologías de Modelos de Cambios de uso del suelo**

Todo modelo es una simplificación de la realidad, el modelo conceptual reduce la dificultad de los procesos de toma de decisiones sobre el uso del suelo en general, y de la decisión de deforestar en particular, pero también ayudan a entender las relaciones entre sus componentes y exponen su lógica funcional (Sierra, 2013).

### **2.9.2. GEOMOD**

Este modelo de cambios de uso del suelo es aquel que predice las ubicaciones de las celdas de la grilla que varían con el paso del tiempo, la cual podría ocurrir hacia adelante o hacia atrás en el tiempo (Eastman, 2012). Este modelo tiene dos elementos: la tasa de cambio de uso del suelo y el lugar donde ocurrirá dicho cambio, para estipular la tasa se utiliza una extrapolación fácil de tasas pasadas basándose en imágenes clasificadas; y para conocer donde ocurrirá la deforestación el modelo utiliza varias capas de datos espaciales de factores biofísicos y socioeconómicos (Winrock Internacional, 2003).

### **2.9.3. Análisis de cadenas de Markov**

Son aquellas que simulan ciertos cambios de predicción de algunas clases de transición se puede utilizar para cuantificar la cantidad de cada categoría en el paisaje. Por tanto, la ubicación de la transición en el cambio está basada en mapas de aptitud y la regla de contigüidad (Pontius *et al.*, 2005).

Son utilizadas para estimar las probabilidades de que un uso de suelo determinado cambie en un periodo dado a otro uso de suelo (Paegelow *et al.*, 2003) por ello resulta ser una herramienta de utilidad para el estudio de la dinámica que se produce en el territorio, aportando información útil cuando se desea generar propuestas para la ordenación y uso del espacio y la planificación del territorio (Paegelow *et al.*, 2003).

Por otro lado resulta ser un potencial descriptivo y predictivo para los análisis de uso de la tierra, también se puede presentar la utilización de una interfase para los análisis de cambios donde se emplea un Sistema de Información Geográfica (SIG) en formato ráster y una aplicación que facilita la construcción y el análisis espacial de los mecanismos de cambio (Clark University, s.f).

#### **2.9.4. Modelador de Cambios en el Terreno (LCM)**

Oñate *et al* (2010), indica que este modelo ayuda a facilitar un completo análisis de los cambios en el suelo a través de la creación de mapas y gráficos del cambio del suelo, transiciones y tendencias de los tipos de suelo. En cuanto al módulo de predicción, es capaz de crear escenarios de cambio del uso del suelo con la unificación de los factores biofísicos y socioeconómicos que influyen en el cambio de uso de la tierra.

El Modelador de Cambios en el Terreno (LCM) para el Sustento Ecológico que es un software integrado dentro de TerrSet, orientado al constante problema de conversión acelerada del terreno y a las necesidades analíticas bien específicas de la conservación de la biodiversidad, hay una función en LCM para ayudar a proyectos dirigidos a la Reducción de Emisiones de la Deforestación y la Degradación de los bosques (Eastman, 2012).

Por otro lado, en varios estudios este modelo fue utilizado para predecir la dinámica de cambio del suelo. En Bolivia, LCM se implementó para estudiar el impacto del desarrollo de carreteras en el uso del suelo y la conservación de la biodiversidad (Oñate-Valdivieso y Bosque Sendra, 2010). En este estudio las carreteras puede crecer sobre la base de las proyecciones del cambio de cobertura del suelo y la información de las carreteras se retroalimenta de nuevo en la predicción del cambio de la tierra. En Madagascar, la LCM fue utilizado para identificar un conjunto de fuerzas motrices que pueden influir en los patrones espaciales de conversión agrícola (Jiang, 2015).

El LCM se utilizó también para analizar el cambio del uso del suelo en México, a través de una matriz de transición de clase, construida con técnicas de regresión para entender las ganancias y pérdidas del de uso del suelo en los bosques (Jaimes 2008). La principal ventaja de este modelo es la sencilla interfaz que puede ser utilizado como una herramienta de apoyo para la evaluación del impacto en el hábitat y la biodiversidad. El resultado proporciona una serie de escenarios espaciales explícitos y mapas de vulnerabilidad. Los mapas de vulnerabilidad son generalmente elegidos para la evaluación del impacto de uso del suelo.

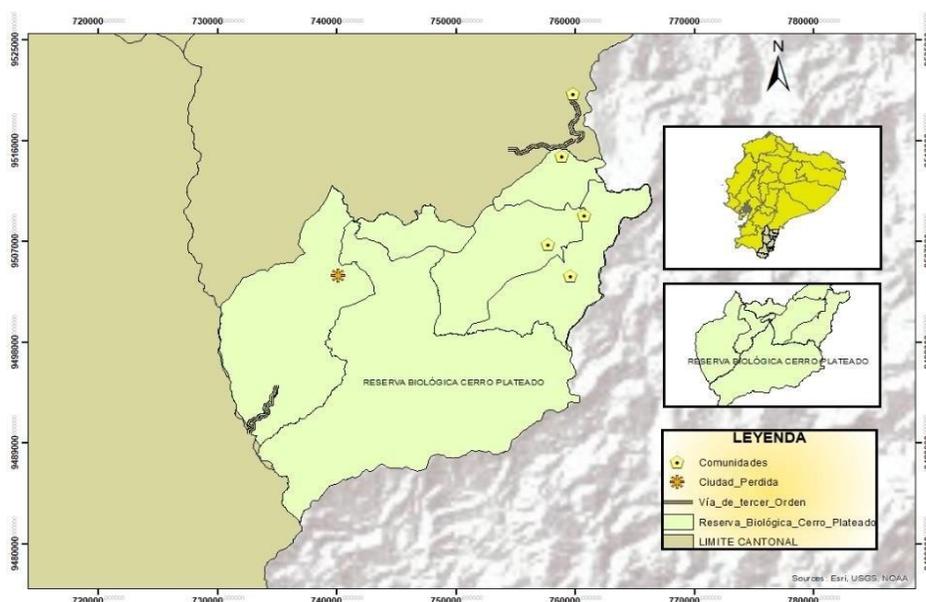
### 3. METODOLOGÍA.

A continuación se presenta la descripción del área de estudio y se detalla el proceso metodológico aplicado a dicha investigación.

#### 3.1. Área de estudio

La Reserva biológica Cerro Plateado se encuentra dentro del bosque y vegetación protector de la cuenca alta del río Nangaritza, cantón Nangaritza, Zamora Chinchipe, el área total posee una extensión de 67161,52 hectáreas aproximadamente y su altitud varía desde los 840 - 3.120 m.s.n.m (MAE, 2018).

Al Norte limita con la Parroquia Zurmi, al Sur con la República del Perú, al Este con la República del Perú, al Oeste con las Parroquias: Porvenir del Carmen y La Canela (Cantón Palanda). La precipitación anual promedio oscila entre 2000 y 3000 mm. Con base en la altitud, se estima que la temperatura promedio anual de las zonas altas oscila entre 10 y 20° C, mientras que en la zona oriental baja se registran temperaturas entre 20 y 24°C (CINFA *et al.*, 2003).



**Figura 1.** Mapa de Ubicación del área de estudios

### **3.2. Base de Datos**

La base de datos comprende información vectorial y de tipo ráster de diferentes bases de datos nacional e internacional detallados de la siguiente manera:

- Modelo Digital del Terreno Modelo Digital de Terreno, Alos Palsar, con resolución espacial de 30 metros, disponible en <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/terrain-corrected-rtc/>
- Imágenes Landsat 5-7 -8, SENTINEL2., Datum WGS 84 de periodos (1986-2000) (2000-2018) disponible en <https://earthexplorer.usgs.gov/>

#### **3.2.1. Software**

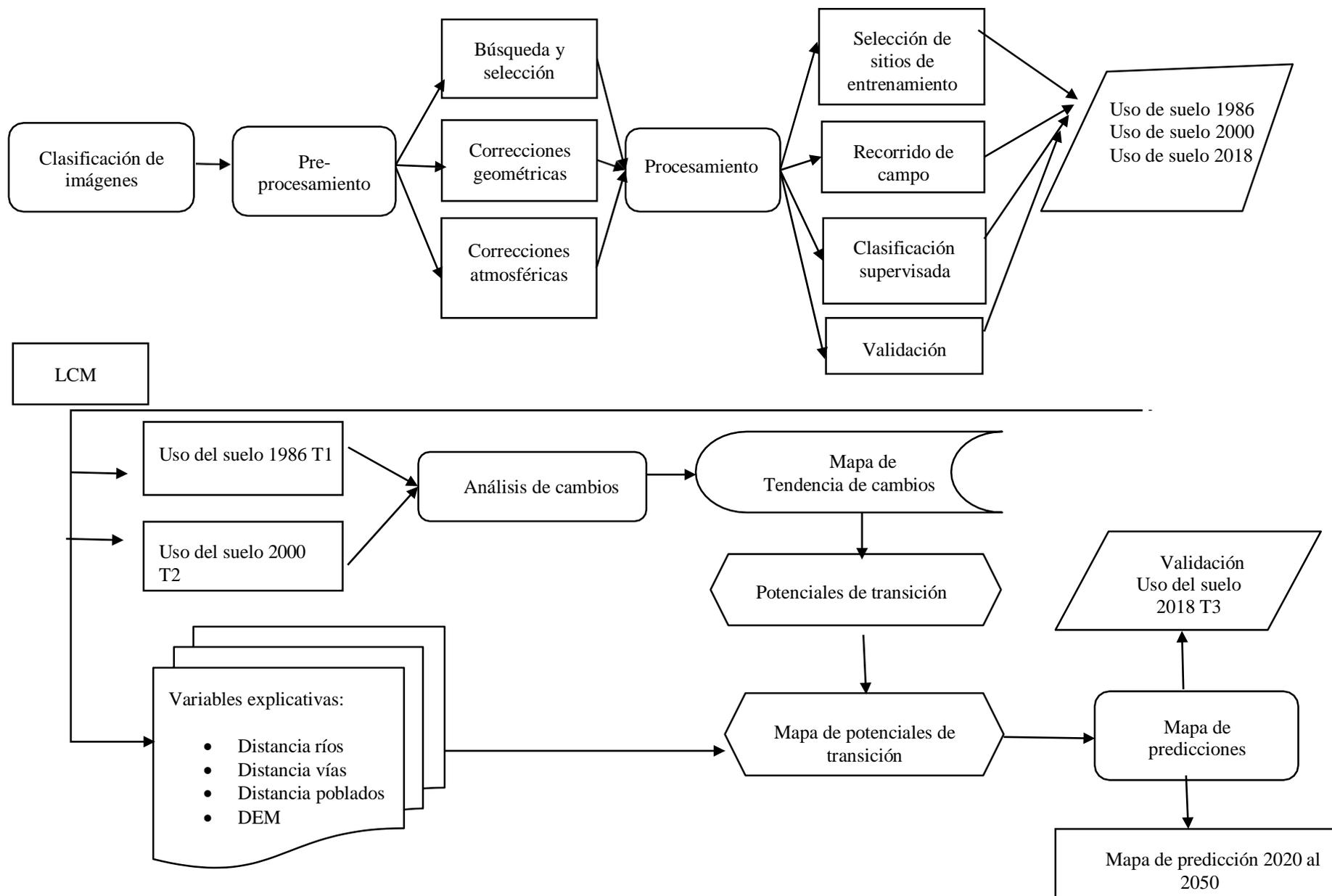
- ERDAS 2015 versión disponible en <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine>
- ARCMAP 10.3 disponible en <https://enterprise.arcgis.com/es/portal/>
- TerrSet versión 18.3 disponible en <https://clarklabs.org/terrset/>

### **3.3. Métodos**

El integrar técnicas de percepción remota para esta investigación es de suma importancia, en este caso se trabajó con el Modelador de Cambios en el Terreno para la Sustentabilidad Ecológica (LCM), disponible en el software TerrSet.

Las fases planteadas en esta investigación fueron en primera instancia el tratamiento de imágenes de satélite donde se detalla el pre-procesamiento y procesamiento de imágenes. De este proceso se obtuvo la clasificación supervisada de imágenes de la zona de estudio para las tres fechas establecidas 1986, 2000 y 2018.

En la segunda fase se realizó todo el análisis de cambio de uso del suelo con el módulo Land Change Modeler (LCM), el mismo que permite analizar el cambio de cobertura del suelo y generar proyecciones a futuro del cambio de uso del suelo. (Land Change Modeler) es un sistema de apoyo innovador dentro de la planificación territorial. (Eastman, 2012)



**Figura 2.** Flujograma metodológico

### 3.3.1. Desarrollo Metodológico

#### a. Adecuación de la Línea Base

Se generó en base a la interpretación de imágenes de satélite disponibles para el año 1986, 2000 y 2018; las capas que se utilizaron en este proceso fueron: ríos, vías y poblados; la misma que se almacenó en una geodatabase, utilizando el sistema de proyección cartográfico World Geodetic System (WGS) 1984, zona 17 sur.

#### b. Recopilación de información

Se emplearon tres imágenes de satélite, las mismas que se consiguió de la base de datos del Servicio Geológico de Estado Unidos (USGS).

### 3.3.2. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

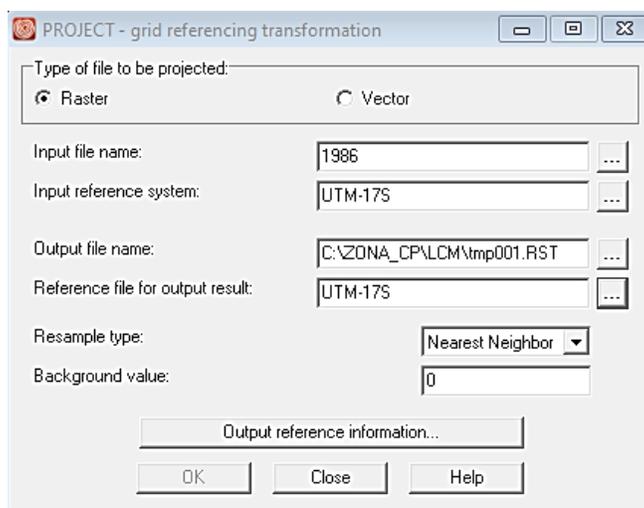
El proceso de búsqueda de imágenes de satélite disponibles de la zona de estudio se puede adquirir en los diferentes servidores web, de esta forma se analizó de forma minuciosa el porcentaje de nubes, problemas de bandeamiento, pixeles perdidos, correcciones geométricas, periodo de disponibilidad. Se realizaron correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas y se obtuvo parámetros físicos. En si se trató de obtener una imagen de buena calidad para poder realizar el procesamiento (Chuvieco, 2002).

**Tabla 1.** Imágenes Utilizadas

<b>Path y row</b>	<b>Fecha</b>	<b>Sensor</b>
10/63	1986-11-02	TM5
10/63	2000-10-31	TM7
10/63	2018-12-18	OLI8

### a. Correcciones Geométricas

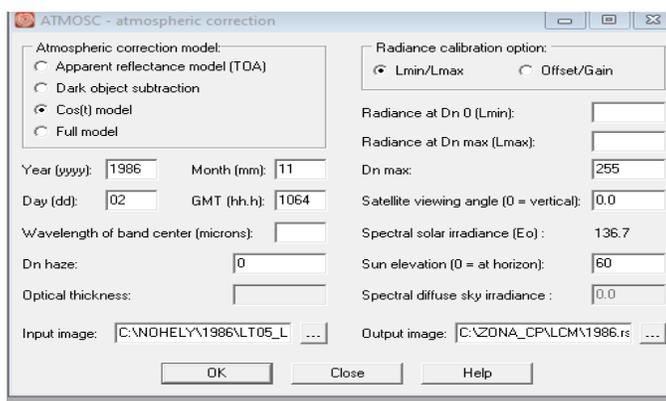
Este procedimiento consistió en transformar las coordenadas de los píxeles de la imagen a través de una combinación polinomial de segundo grado. Una vez obtenida la información, se ejecutó una corrección geométrica u orto rectificación de las imágenes de tal forma que se eliminen las distorsiones topográficas en la superficie terrestre. Las imágenes de satélite seleccionadas fueron corregidas en la metadata con la posición geométrica a la zona de Ecuador, en la proyección WGS84 zona 17S.



*Figura 3.* Módulo para realizar corrección geométrica

### b. Correcciones radiométricas:

Por otro lado las correcciones atmosféricas se llevaron a cabo a cada una de las imágenes, con el fin de eliminar los problemas causados por las distorsiones de la atmósfera al momento de toma de las escenas. En este caso se trabajó con el módulo de Atmosc disponible en el software TerrSet. (Figura 4)



**Figura 4.** Módulo para realizar corrección atmosférica

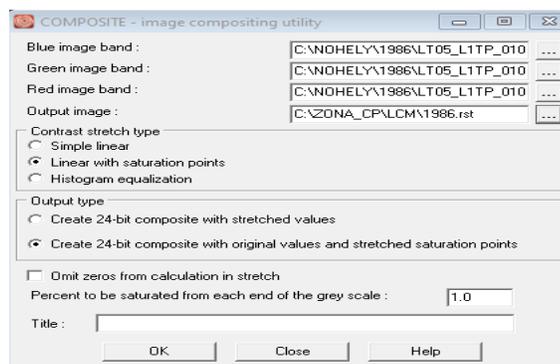
### 3.3.3. Procesamiento de imágenes

El análisis digital de datos engloba una serie de técnicas de manipulación numérica de datos contenidos en imágenes digitales, este proceso se necesita obtener el producto final de una imagen de satélite, en lo que respecta a su clasificación supervisada, de la cual se requiere tener un previo conocimiento del territorio para realizar la clasificación (Eastman, 2016).

Se empleó el Software TerrSet, el mismo que está diseñado para monitorear y modelar el sistema terrestre para el desarrollo sostenible. A demás incorpora herramientas de análisis de IDRISI GIS y de procesamiento de imágenes IDRISI junto con un agregado de aplicaciones adicionales (Eastman, 2016).

#### 3.3.3.1. Composición de color

En el software Terrset podemos encontrar el módulo “CREATE COLOR COMPOSITE” el mismo que nos permitió realizar una composición de bandas RGB para cada una de las imágenes de satélite previamente corregidas, este proceso dio como resultado un compuesto multiespectral para facilitar el análisis visual de las firmas espectrales (Eastman, 2012). Por otro lado se puede desarrollar varias composiciones de color dependiendo el tipo o variable de estudio haciendo uso de las bandas correspondientes de cada imagen (Lo Vecchio *et al.*, 2016).

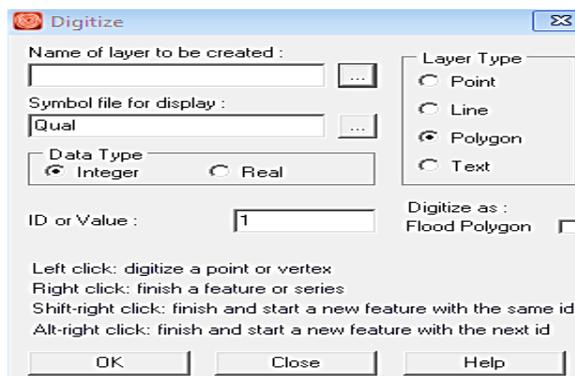


**Figura 5.** Módulo Create color composite

### 3.3.3.2. Identificación de sitios de entrenamiento

La identificación de sitio o regiones de interés, son un conjunto de píxeles representativos y homogéneos de cada clase de uso del suelo, este procedimiento fue llevado a cabo a través de la herramienta “DIGITALIZE”.

Cabe recalcar que fue necesario obtener una muestra significativa de firmas espectrales basados en la interpretación visual y servirse de información de estudios existentes con el fin entrenar el clasificador. El objetivo de entrenar el clasificador es dar ejemplos de la variedad de firmas espectrales asociadas con cada clase en el mapa (Olaya, 2014).



**Figura 6.** Módulo Digitalize

### 3.3.3.3. *Clasificación Supervisada*

La clasificación supervisada es un tipo de clasificación que se basa fundamentalmente en separar las clases de uso del suelo con un previo conocimiento de la zona de estudio, de tal forma que el investigador asigna la categoría a la que corresponde cada píxel de la imagen (Erdas Imagine, 2001).

Para clasificar las imágenes se definió previamente la escala de trabajo y las clases de cobertura, de acuerdo al protocolo de leyenda temática establecida por el programa de socio bosque del MAE 2012. Las imágenes Landsat tienen resolución espacial de 30 metros del tamaño de píxel, la escala de trabajo utilizada fue de 1:250,000, estas imágenes son óptimas para trabajar a nivel regional, las coberturas que se identificaron se describen en la Tabla 2

**Tabla 2.** Clases de cobertura

CDO	Cobertura
1	Bosque
2	Páramo
3	Matorral
4	Pasto
5	Cuerpos de agua
6	Nube
7	Sombra
8	Suelo abierto

Fuente: Elaboración propia con datos del MAE 2017

#### **a. Fase de asignación**

Una vez analizadas y reagrupadas las firmas se ejecutó la clasificación teniendo en cuenta algunos tipos de clasificadores:

Clasificador de mínima distancia

Clasificador de paralelepípedos

Clasificador de Mahalanobis distance

Clasificador de Máxima Probabilidad

En este caso se trabajó con el clasificador MAXLIKE (máxima probabilidad) puesto que fue el que más se acopló al área de estudio y segregó de mejor manera las coberturas antes mencionadas, por otro lado Chuvieco (2008) menciona que este clasificador es más empleado por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición de los datos.

### **b. Análisis post clasificación**

A través del software Erdas se exportó la clasificación supervisada de los tres periodos correspondientes este proceso se lo utilizó con el fin de reorganizar aquellos pixeles que se categorizaron de forma incorrecta, es decir agrupar o eliminar categorías que por tener la misma reflectividad son difícilmente separables, a través de la herramienta “Áreas de Interés (ADI)” (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2015).

De forma manual se creó polígonos, verificando la correcta clasificación de los lugares más confusos, y posterior a esto se obtuvo las clases finales de la clasificación (Tabla 2) que servirán para realizar los mapas correspondientes con su respectivo análisis. El software ERDAS IMAGE 2015, nos ayudó a clasificar de manera correcta todos los pixeles que se categorizaron de forma incorrecta. Por otro lado se pudo corregir el famoso efecto “sal y pimienta” que se obtuvo en la clasificación Max Like de TerrSet (Mas, Gao y Pacheco, 2010).

### **c. Validación de la clasificación**

La validación de resultados permite determinar la calidad de la información de la clasificación (Congalton y Green, 2009). La característica principal de esta etapa es el uso de la matriz de transición o matriz de error (Xie *et al.*, 2008).

- **Exactitud del productor:** indica la probabilidad de que un pixel de una clase defina esté correctamente clasificado
- **Exactitud del usuario:** indica la probabilidad de que un pixel clasificado como una clase establecida corresponda exactamente a dicha clase
- **Procesión global:** es el porcentaje de pixeles clasificados correctamente

- **Índice de kappa:** es una media de concordancia, precisión o exactitud de la clasificación que el software QGIS 3.4. calculó automáticamente (Vargas-Sanabria y Campos-Vargas, 2018).

Landis & Koch, 1977 citado en (Vargas y Campos, 2018), establecieron rangos de precisión para el índice Kappa, divididos en tres grupos: mayor a 0.80 fuerte, 0.40-0.80, moderada y menor a 0.40 pobre.

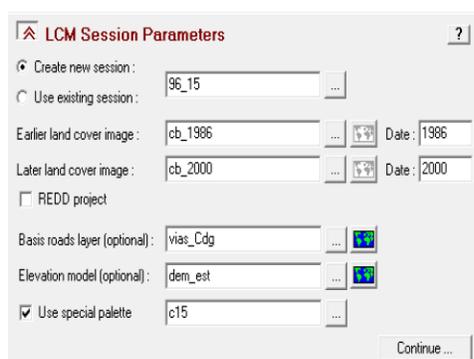
### **3.3.4. Metodología para objetivo dos: Analizar el cambio de uso del suelo (1986-2000 y 2000-2018)**

A continuación se explica el procedimiento que se utilizó para el análisis de los cambios de uso del suelo y la tasa de deforestación, entre los dos periodos correspondientes.

#### ***3.3.4.1. Análisis del cambio de uso del suelo 1986-2018***

Por medio del módulo Land Change Modeler, se obtuvieron las pérdidas, ganancias cambio neto y contribución al cambio neto de las diferentes coberturas, para obtener como resultado los mapas con los cambios que han sucedido entre estos periodos.

Además, permite hacer modelos de predicción a futuro, así como evaluar las implicaciones que dichos cambios conllevan en los hábitats y la biodiversidad. Este módulo incorpora la opción de utilizar variables dinámicas de uso del suelo y de accesibilidad (Eastman, 2012).



**Figura 7.** Interfaz de cambios de uso del suelo dentro del LCM

En primera instancia se empleó las imágenes previamente clasificadas de 1986, 2000 y 2018, esta información fue propicia para iniciar el análisis de los cambios correspondientes de uso del suelo dividido en dos periodos de tiempo 1986-2000 y 2000-2018; este parámetro generó varias evoluciones graficas de los cambios ocurridos en dichos periodos.

#### **a. Análisis de la tasa de deforestación**

Para calcular las distintas métricas de deforestación, se utilizará las fórmulas empleadas en el estudio “**Estimación de la Tasa de Deforestación del Ecuador Continental**” ” (MAE, 2017). La primera corresponde a la deforestación total anual promedio para un período determinado, definida como:

$$R = \frac{A1 - A2}{t2 - t1}$$

Donde R es la deforestación total anual promedio, A2 y A1 son las áreas de bosque en la fecha final (t2) e inicial (t1), respectivamente (Puyravaud 2003).

Adicionalmente, se realizar el cálculo de la tasa de cambio anual, que se obtuvo por medio de la comparación del área cubierta por bosque en la misma región en dos épocas diferentes. La fórmula que se empleó en el estudio resulto de una tasa porcentual anual, usada frecuentemente para cálculos de esta índole (Puyravaud 2003).

$$q = \left( \frac{A2}{A1} \right)^{1/(t2-t1)} - 1$$

Donde q es la tasa de cambio anual, A2 y A1 son las áreas de bosque en la fecha final (t2) e inicial (t1), respectivamente (Puyravaud 2003).

### **3.3.5. Metodología para objetivo 3 tres: Generar escenarios de cambio del uso del suelo al año 2050**

Para modelar los cambios futuros de deforestación se realizó un procedimiento que implicó el análisis de variables determinadoras de cambios y la construcción de un modelo que use estas variables para generar un escenario futuro de cambios (Eastman, 2012).

Este procedimiento se desarrolló en base a los siguientes requerimientos:

- 1) Análisis de cambios.
- 2) Modelador del potencial de transición.
- 3) Predicción de cambios.

#### **3.3.5.1. Generación de escenarios futuros de Deforestación al año 2050**

En primer instancia se elaboró dos escenarios de cambios históricos, uno entre el periodo 1986-2000 y el otro escenario en el periodo 2000-2018; en el primer escenario se evaluó los cambios de este periodo y a partir de esto se creará una imagen de uso del suelo estimada al año 2018, la misma que fue validada con la imagen real de uso del suelo actual al 2018, el proceso de validación sirvió para obtener el porcentaje de certeza de la estimación y así realizar las proyecciones al año 2050, en periodos de 5 años.

El segundo escenario se desarrolló en 2000-2018, con el mismo procedimiento del escenario uno antes mencionado se pudo generar la estimación al 2050, tomando en cuenta intervalos de tiempo cada cinco años cada uno. Para crear los mapas de transiciones, se estableció una transición

menor a 1000 ha, con el propósito de filtrar únicamente las clases más significativas y las que son esenciales para entender y modelar los cambios.

#### **3.3.5.2. Variables explicativas:**

Existen ciertas variables explicativas que se necesitan conocer puesto que, dichas variables son conductoras de la deforestación, analizados desde imágenes de satélite. (Painter, 2013, p. 14).

Es importante conocer estas variables puesto que ayudó a simular donde ocurrirá la deforestación dentro del modelo juegan un importante rol para obtener los sitios de explotación del paisaje (Brown, Sierra, Douglas Southgate y Lobao, 1992).

- El porcentajes de pérdida de cobertura vegetal desarrolla con la vecindad a los caminos (Geist y Lambin, 2002). Sin embargo, la influencia de cada camino depende de su transitabilidad.
- La distancia a ríos es importante por el transporte fluvial en la zona de estudio.
- La elevación y pendiente, son factores de selección para la ubicación de actividades productivas, sobre todo al efecto topográfico sobre la temperatura, por la gradiente térmica, la humedad.

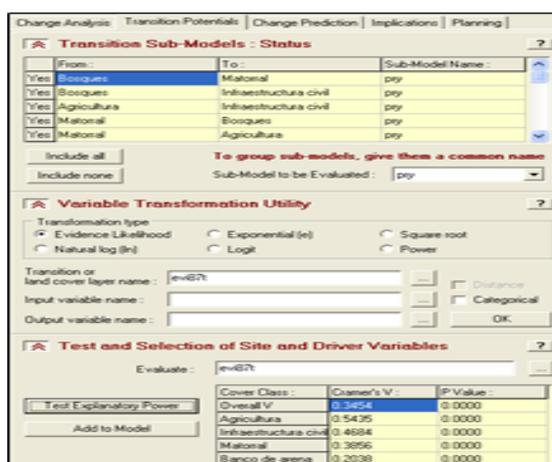
Las variables explicativas que se seleccionaron para graduar el modelo fueron: distancias áreas de cambios, distancia a localidades, distancia a ríos, caminos, y DEM; a continuación se detalla en Anexo 3.

#### **3.3.5.3. Potenciales de transición**

Aquí se generó una imagen de evidencia del cambio empírico, se construyó un mapa booleano de las zonas que han sido deforestadas entre 1986-2000 y 2000-2018, con los mapas de cobertura vegetal de 1986 y 2000, representan la frecuencia relativa en que los diferentes tipos de cobertura del suelo ocurrieron dentro de las zonas que cambiaron desde el año 1986-2000 y 2000-2018.

La valoración estadística se realizó a través de la variable de Cramer (V) la misma que, sugiere que una variable con un valor mayor a 0.15 de V es útil para explicar los cambios en la cobertura vegetal (Sangermano y Eastman, 2012).

Una vez culminado el análisis estadístico, se procedió hacer el análisis MLP Neural Network, MLP este análisis realiza una clasificación de imágenes de sensores remotos por medio de la técnica de percepción multicapa de redes neuronales artificiales (Eastman, 2012). Donde la tasa de precisión debe ser mayor al 75%, para que el modelo sea coherente y se estime la proyección correctamente.



**Figura 8.** Evaluación de las áreas potenciales de transición

#### 3.3.5.4. Predicciones del cambio de uso del suelo

La predicción fue desarrollada en el módulo Change Prediction, donde se generó los mapas de uso del suelo al 2050, considerando periodos de tiempo en intervalos de cinco años; se generaron dos mapas uno de variable discreta que represento el uso del suelo y otro en escala continua que represento el riesgo de cambio.

#### 3.3.3.4. *Calibración y validación del modelo*

Según Pontius *et al.*, (2007) este proceso es de vital importancia para la predicción cuantitativa, en el modelado LUCC basado en SIG, se puede evaluar una simulación comparándola con su mapa de referencia, considerado como una observación "verdadera" (Pontius et al., 2008).

La validación fue llevada a cabo mediante el módulo ROC y la observación real; donde la estadística determina cuanto una superficie continua predice bien los lugares dado la distribución de una variable booleana, adquiriendo el porcentaje de aceptación del modelo generado con las variables que se utilizó en dicho proceso (Eastman, 2012). Como producto final se obtuvo un mapa con la distribución espacial de los errores y aciertos del modelo. Con el presente mapa se pudo obtener el porcentaje de certeza basado en la siguiente fórmula (Pontius y Schneider, 2015; Max et al., 2018).

$$\text{Porcentaje de certeza (\%)} = \text{Hits}/(\text{Hits} + \text{False Alarma})$$

**Hits:** número de celdas acertadas

**False alarma:** número de falsos cambio

## 4. RESULTADOS

En el presente capítulo se muestra los resultados de la clasificación de las imágenes satelitales comprendidas en los diferentes años, interpretación de los cambios de uso del suelo y los futuros escenarios de cambio en la Reserva Biológica Cerro Plateado.

### 4.1. Área de uso y cobertura de suelo

En la Reserva Biológica Cerro Plateado la cobertura de bosque fue de 62534,31 ha (93,09%) para el año 1986, mientras que para el año 2000 disminuyó 61424,67 ha (91,44%) y posteriormente para el año 2018 fue de 58853,90 ha (87,615%). A pesar de que en la zona de estudio predomina el bosque nativo se evidencia una pérdida significativa de 3680,41 ha, con un promedio de 115,01 ha/año. Por otro lado en la zona de estudio los páramos ocuparon 3495,79 ha (5,20%) para el año 1986, mientras que para el año 2000 fue de 3501,83 ha (5,21%) y para el año 2018 representó 3501,09 ha (5,21%) es decir el cambio en esta cobertura no fue muy significativa. Por lo contrario la cobertura de pastos aumentaron considerablemente, lo que indica un irreversible cambio de usos del suelo que afecta a la zona de estudio, como muestran los datos presentados en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Cobertura y uso del suelo en los años 1986, 2000 y 2018

CDG	COBERTURA	Año 1986		Año 2000		Año 2018	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%
1	Bosque	62534.31	93.09	61424.67	91.44	58853.90	87.61
2	Páramo	3495.79	5.20	3501.83	5.21	3501.09	5.21
3	Matorral	0.18	0.00	1.49	0.00	0.09	0.00
4	Pasto	335.38	0.50	1444.84	2.15	3962.77	5.90
5	Cuerpo de agua	599.64	0.89	599.95	0.89	596.70	0.89
6	Suelo abierto	15.98	0.02	8.98	0.01	17.28	0.10
	<b>TOTAL</b>	<b>67177.72</b>	<b>100.00</b>	<b>67177.72</b>	<b>100.00</b>	<b>67177.72</b>	<b>100.00</b>

El pasto corresponde a las actividades agrícolas de ganadería extensiva y cubren el 0,50% para el año 2018, en cambio para el año 2000 fue de 2,15% y finalmente para el año 2018 observamos un incremento de 5,90% esto se debe principalmente a la agricultura y ganadería, puesto que estas actividades sirven para la subsistencia de la población del sector (Tabla 3).

En la Reserva Biológica Cerro Plateado se identificaron zonas de suelo abierto como los depósitos de arena y piedras que abarcan 0.02% equivalente a 15,98 ha para el año 1986, mientras que para el año 2000 fue de 0,01% y posteriormente para el año 2018 fue de 0,1'%. Con respecto a los bancos de arena cerca de las zonas ribereñas del territorio para el año 1986 fue de 0,02%, mientras que para el año 2018 fue de 0,10% es decir el cambio fue significativo. Además, en la zona de estudio se identificó que los cuerpos de agua no presentaron variaciones significativas.

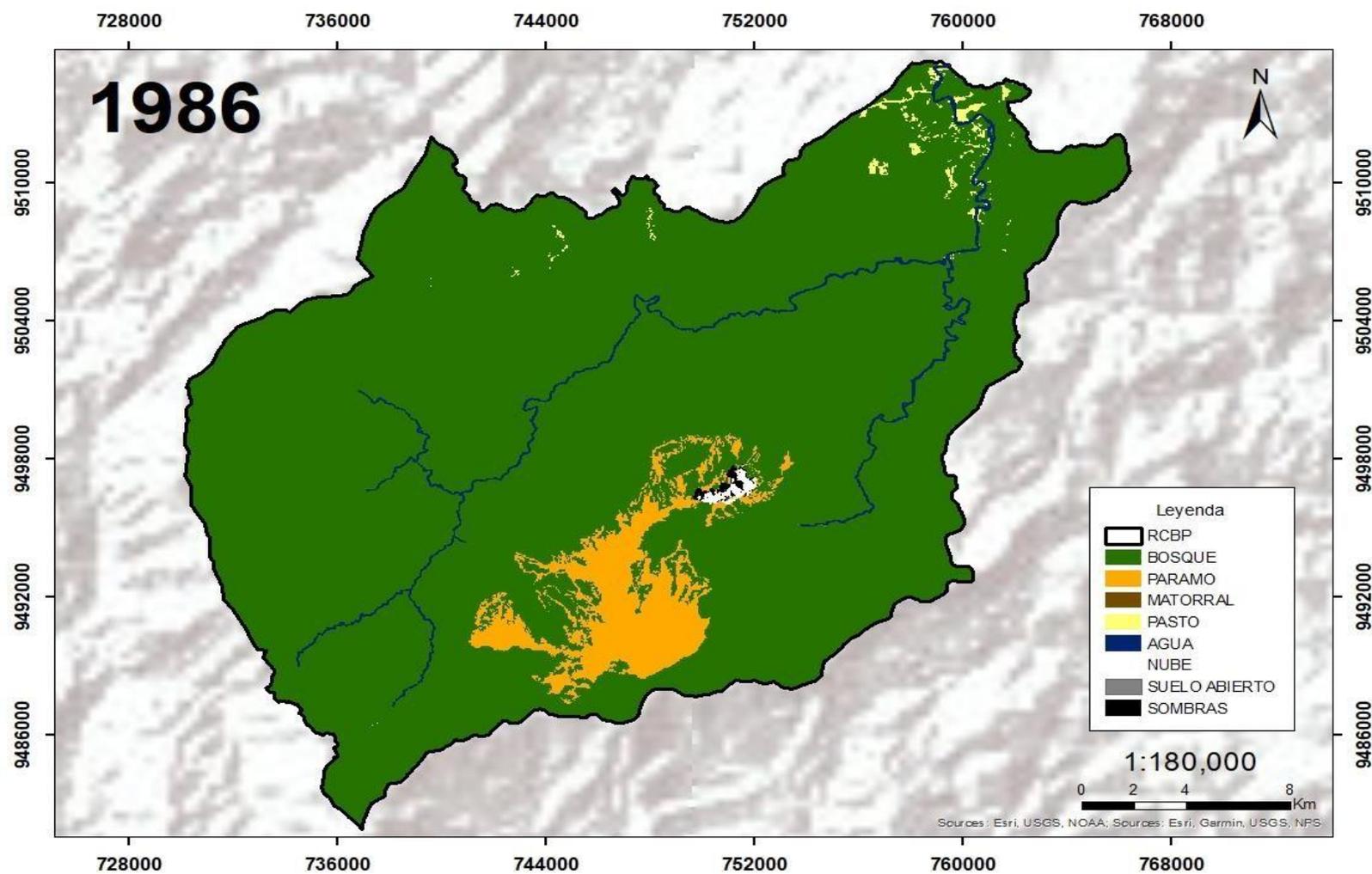


Figura 9. Componentes básicos de un mapa 1986

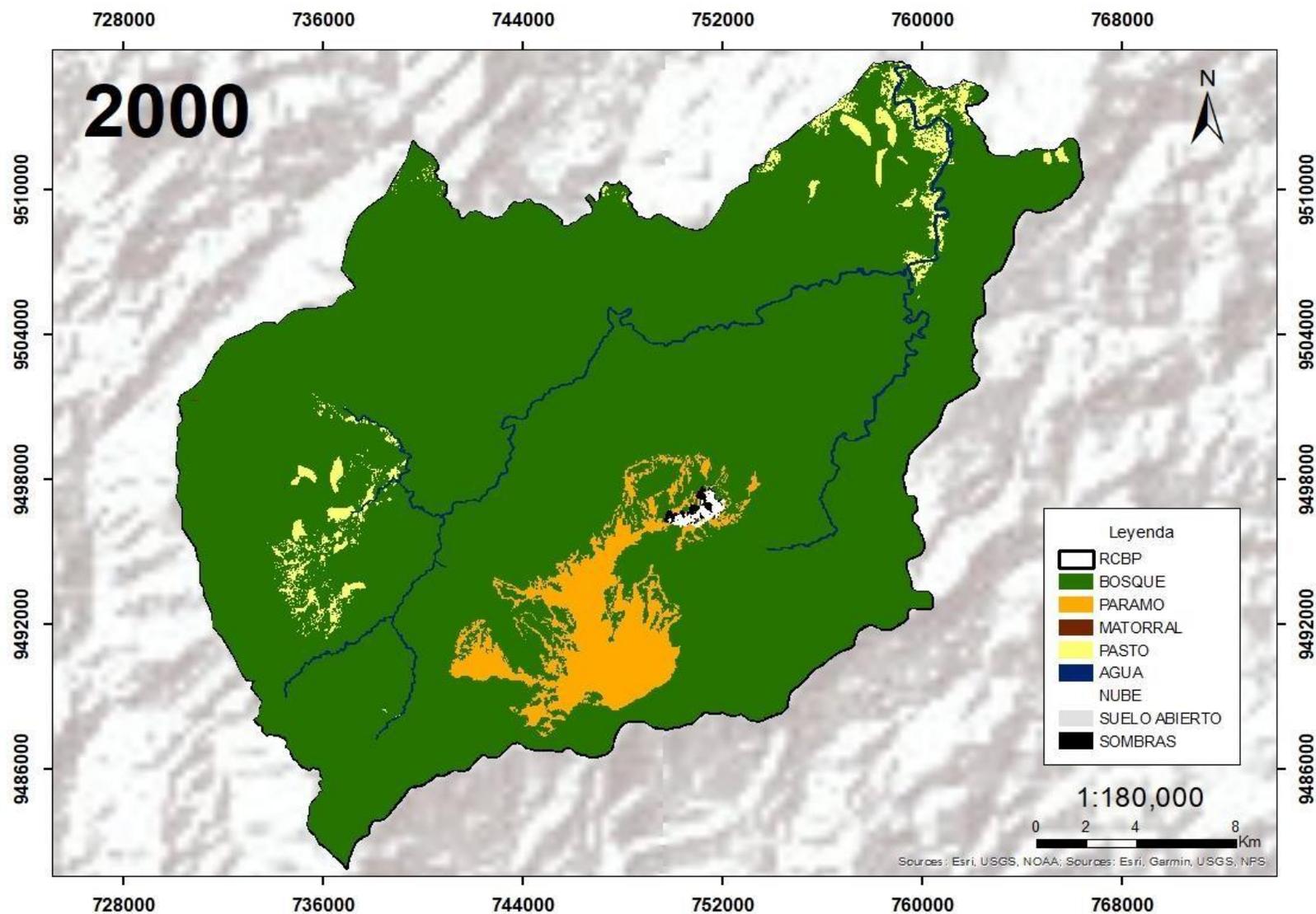
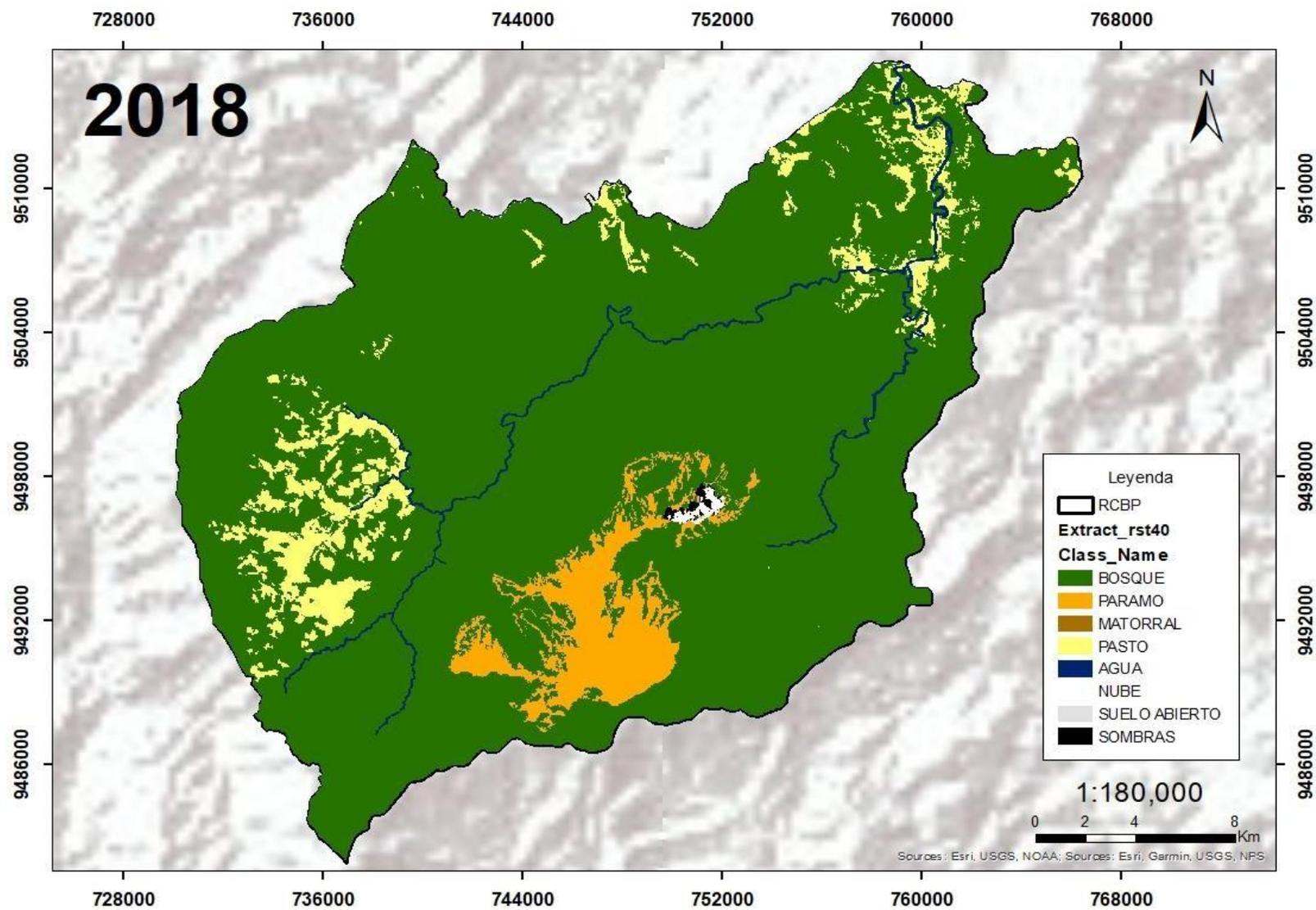


Figura 10. Componentes básicos de un mapa 2000



*Figura 11.* Componentes básicos de un mapa 2018

- **Deforestación anual y tasa de deforestación (1986-2000)**

La Tabla 4 presenta los resultados de los cálculos de deforestación anual del área de estudio, de 79.26 ha/año lo que anualmente significa 5.34ha/año y una tasa anual de deforestación de -0.057% para los años 1986 y 2000, abarcando un período de 32 años.

**Tabla 4.** Deforestación anual y tasa de deforestación periodo 1986-2000

	Área de bosque 1986	Área de bosque 2000	Deforestación anual	Tasa anual de deforestación
	(ha)	(ha)	(ha)	(%)
<b>RESERVA BIOLÓGICA CERRO PLATEADO</b>	62534.31	61424.67	79.26	-0.057

Se puede evidenciar una tasa considerable de deforestación que ha alterado de forma significativa la zona de estudio, todo esto debido a las actividades antrópicas y crecimiento demográfico presentes en el área de estudio.

- **Deforestación anual y tasa de deforestación (2000-2018)**

La deforestación anual en la RBCP en este periodo fue de 183.63 ha/año, lo que equivale a que anualmente se talaron 8.58 ha/año con una tasa anual de deforestación de -0.13%, esto permite observar diferencias significativas en la dinámica de cambio entre ambos periodos probablemente influenciada, en mayor medida, por las actividades antrópicas presentes en el sector (Tabla 5)

**Tabla 5.** Deforestación anual y tasa de deforestación periodo 2000-2018

	Área de bosque 2000	Área de bosque 2018	Deforestación anual	Tasa anual de deforestación
	(ha)	(ha)	(ha)	(%)
<b>RESERVA BIOLÓGICA CERRO PLATEADO</b>	61424.67	58853.90	183.63	-0.13

## 4.2. Cambios de uso del suelo en los periodos 1986-2000 y 2000-2018

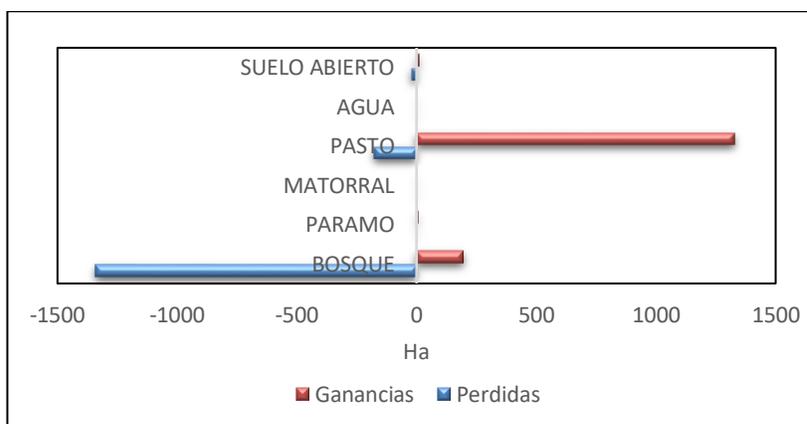
Los principales cambios del suelo en los periodos de 1986-2000 Y 2000-2018 se detallan en la matriz de transición (Anexo 1) y (Anexo 2) se resume en pérdidas, ganancias y cambio que ha sufrido cada cobertura de uso del suelo.

### 4.2.1. Análisis del cambio y uso del suelo en el periodo 1986-2000

- **Ganancias y pérdidas**

Con respecto a las ganancias, durante el período 1986-2000 en la Reserva Biológica Cerro Plateado la cobertura de pasto presentó mayores ganancias con respecto a las otras coberturas, abarcando una superficie de 1329 ha, el bosque con 195 ha, la zona de páramo con 6 ha y el área de suelo abierto vegetal con 10 ha (Figura 12)

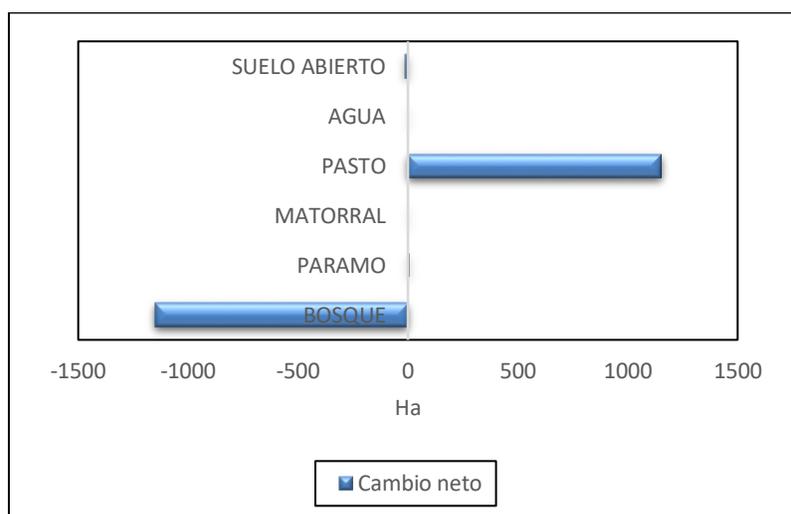
Por otro lado, se evidenció que la cobertura de bosque ha tenido mayores pérdidas con relación al resto de coberturas, cuya superficie de aproximadamente 1342 ha, seguido por pastos con 177 ha y el suelo abierto con 22 ha. Las coberturas restantes no han presentado cambios significativos



**Figura 12.** Ganancias y pérdidas en el periodo 1986-2000

- **Cambio Neto**

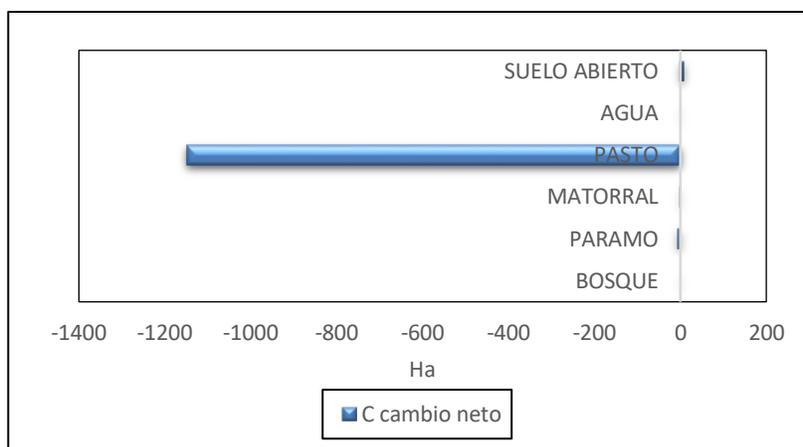
En el periodo 1986-2000 en la Reserva Biológica Cerro Plateado, las coberturas alcanzaron cambios muy significativos. El bosque es la cobertura que presento mayor cambio con una pérdida de 1148 ha, puesto que los pastos son los que mayores ganancias obtuvo en relación a otras coberturas con 1153 ha (Figura 13).



*Figura 13.* Cambio neto periodo 1986-2000

- **Contribución al cambio neto**

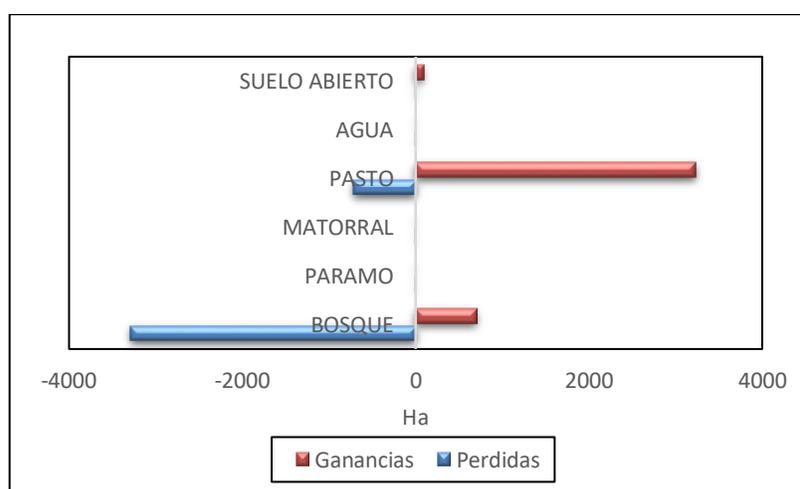
Por otro lado, los pastos son las coberturas que contribuyeron en mayor medida al cambio con aproximadamente (-1148 ha), esto debido al acelerado desarrollo económico de la población ya que la zona de estudio es el hogar de algunas población de origen Shuar, que ha ido incrementado a lo largos de los años y con el fin de aprovechar sus tierras con fines productivos. Por el contrario, el resto de coberturas vegetal y los cuerpos de agua no contribuyeron al cambio del bosque (Figura 14).



**Figura 14.** Contribución al cambio neto periodo 1986-2000

#### 4.2.2. Análisis del cambio y uso del suelo en el periodo 2000-2018

Para el periodo 2000-2018 la Reserva Biológica Cerro Plateado sufrió transformaciones relevantes en su cobertura, por ende, perdió -3290 ha de bosque, por el contrario, la ganancia de bosque fue ganó 709 ha. La pérdida de pasto fue significativa de 719 ha y con ganancias de 3235 ha, el suelo abierto obtuvo ganancias de 89 ha, y pérdidas -10 ha. En cuanto a las otras coberturas no se presentaron cambios significativos.

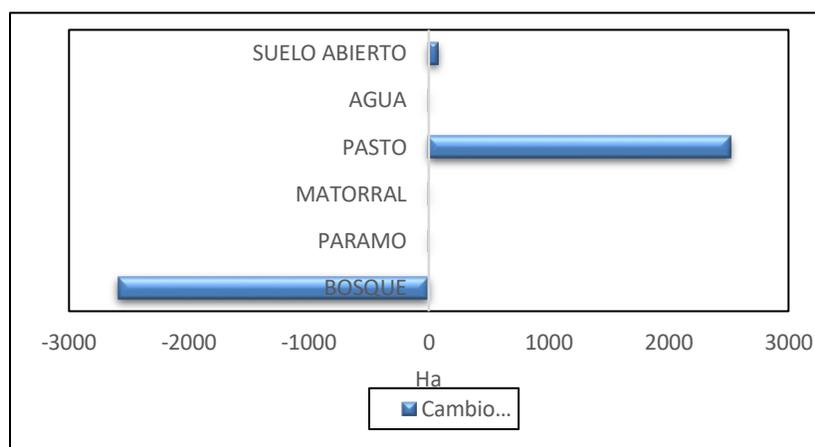


**Figura 1.** Ganancias y pérdidas en 2000-2018

En la figura 15, se muestran los resultados descritos inicialmente, sobre los cambios y transiciones significativas de las diferentes coberturas, donde los más notables son principalmente el aumento de pastos y la disminución de bosque.

- **Cambio neto**

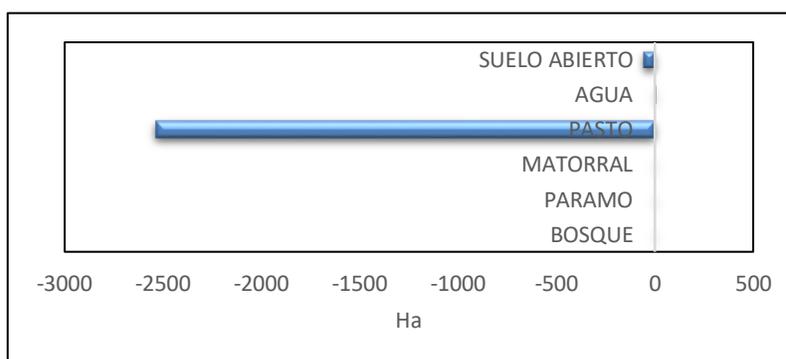
En la misma línea que los resultados anteriores, el bosque experimentó una disminución neta de -2589 ha; mientras que los pastos obtuvieron ganancias netas de 2516 ha, el suelo abierto también presentó un cambio significativo de 79 ha y los cuerpos de agua presentaron una disminución de -5 ha (Figura 16).



*Figura 16.* Cambio neto en 2000-2018

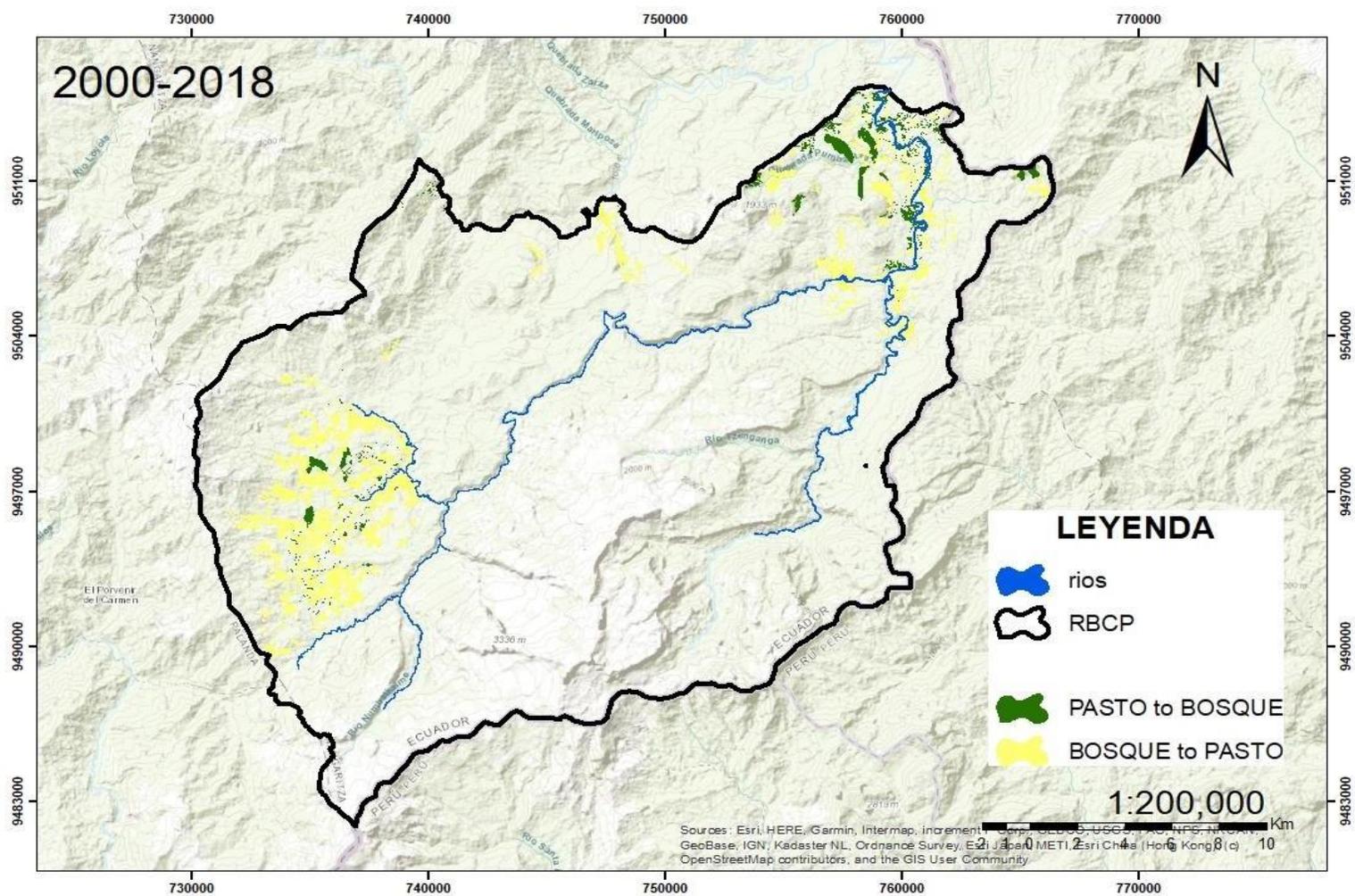
- **Contribución al cambio neto**

Por otro parte, la cobertura que ha ejercido mayor presión y ha contribuido a la pérdida de bosque son los pastos con aproximadamente -2537 ha y el suelo abierto con -57 ha respectivamente. Mientras que la contribución de los cuerpos de agua, para este cambio no fue significativa (Figura 17).



*Figura 17.* Contribución al cambio neto en 2000-2018

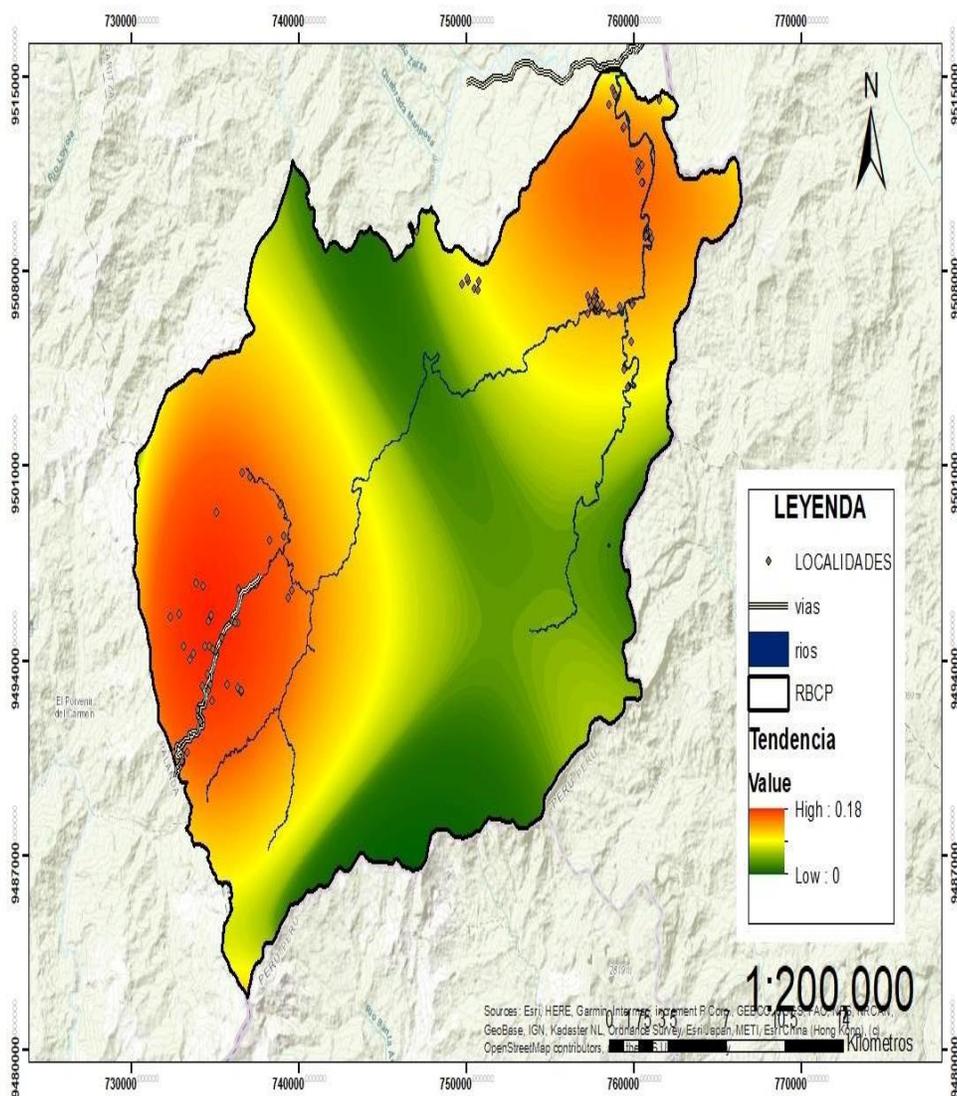




*Figura 19.* Mapa de cambios 2000-2018

- **Tendencia de cambio**

Para la tendencia de cambio en el periodo que se muestra en la figura 20, en base a la escala del mapa, se observa que los valores de mayor cambio se distribuyen a lo largo de poblados y las vías de acceso que en la actualidad existe; y también en la cercanía a los poblados que están dentro del área de estudio. El impacto de cambio producido por el medio fluvial se nota debido a que es el único medio de transporte a zonas de difícil acceso.



*Figura 20.* Mapa de tendencia de cambio

### 4.3. Modelamiento de escenarios de cambio de uso del suelo al año 2050

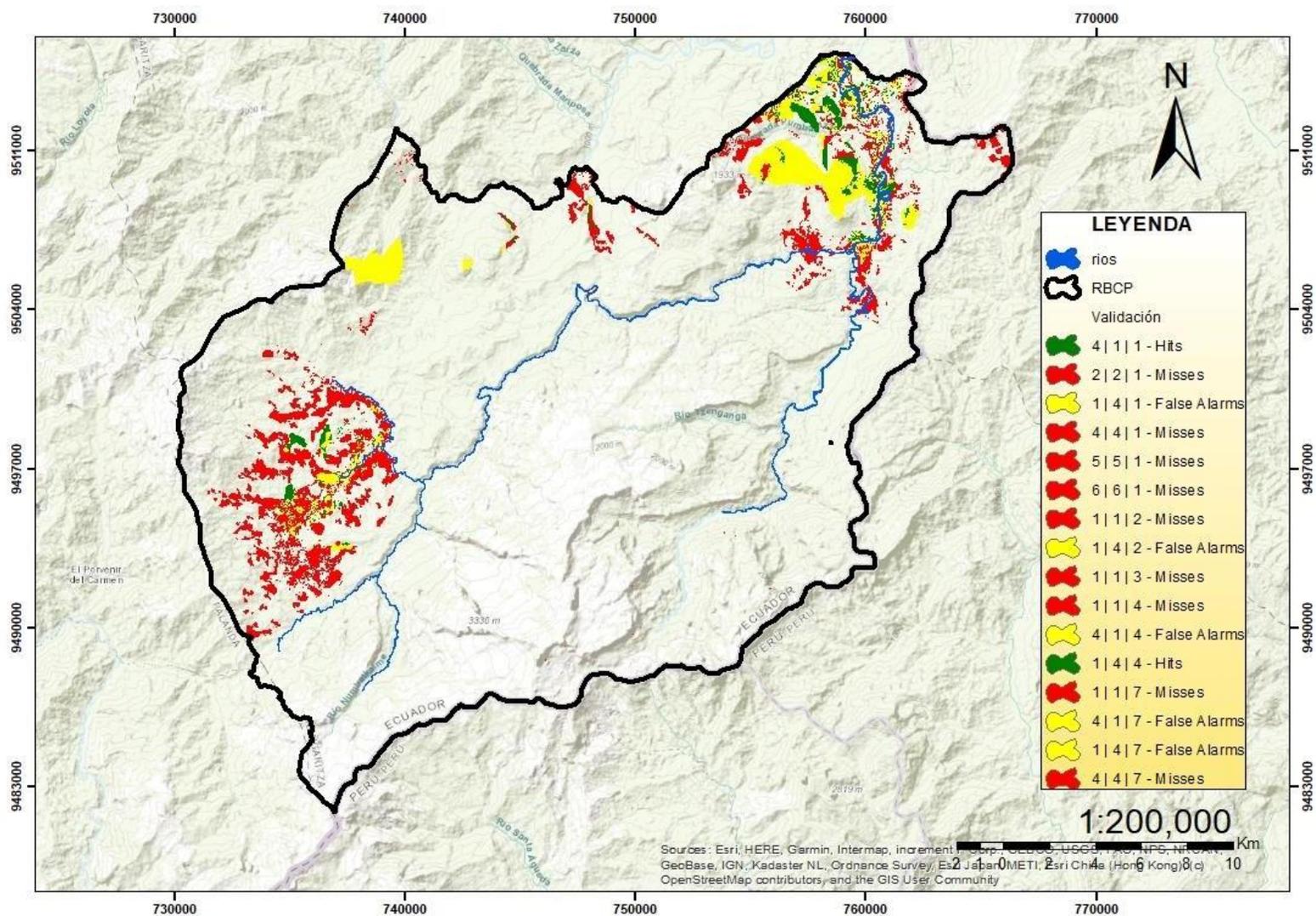
#### 4.3.1. Escenario proyectado versus real de uso del suelo al 2018

En la tabla 6, se detalla los valores numéricos, la concurrencia con el mapa de cobertura vegetal entre el valor estimado y el real. La cobertura de bosque, el modelo subestimó con el 0.30% al valor real, la categoría de páramo con -0.03%, el pasto tuvo una sobreestimación del 1.37% al valor real, el suelo desnudo tiene un 0.4% de sobreestimación del valor real, y los cuerpos de agua con el 0.01% respecto al real.

**Tabla 6** Comparación del Uso y cobertura del suelo real y proyectado del año 2018.

CDG	COBERTURA –	PROYECCIÓN			
		Real	Estimado	Cambio	%
1	Bosque	58853.90	58653.90	200.00	0.30
2	Páramo	3501.09	3519.63	-18.54	-0.03
3	Matorral	0.09	2.07	-1.98	0.00
4	Pasto	3962.77	3059.91	902.86	1.37
5	Cuerpo de agua	596.70	604.08	-7.38	0.01
6	Suelo abierto	67.28	82.8	-15.52	0.02
<b>TOTAL</b>		<b>67177.72</b>	<b>67177.72</b>		

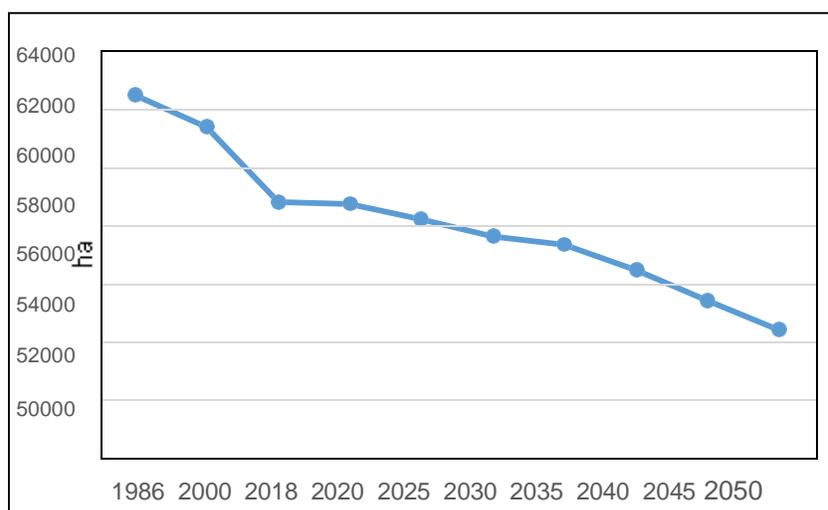
Aplicando la validación del modelo en base a la imagen real del 2018, se obtuvo el mapa que se muestra en la Figura 21 que espacialmente representa el número de píxeles que predijeron correctamente (coloración verde), sumando a los falsos cambios (color amarillo) y los omitidos (color rojo). Aplicando la fórmula para estimar la certeza del modelo se obtuvo un  $\approx 39\%$ .



*Figura 21.* Mapa de validación del modelo de deforestación

### 4.3.2. Escenarios de deforestación al 2050

Por otro lado en este proceso se determinó que las áreas de bosque van a disminuir por el incremento de pastos, siendo la ganadería la principal actividad productiva que predomina como conductor de este cambio de uso del suelo. En la figura 22, se establece que la tendencia de la deforestación al 2050, lo que significa que anualmente se deforestará 126.11 ha/año, y la tasa de deforestación estimada es de 0.44%.



**Figura 22.** Tendencia de deforestación del periodo 1986-2050

En la figura 22, se muestra el mapas de cobertura vegetal estimados al 2050, divididos en intervalos de cinco años, donde se observa como la dinámica del cambio de uso del suelo va a tener en este periodo considerando los intervalos de tiempo cada cinco años.

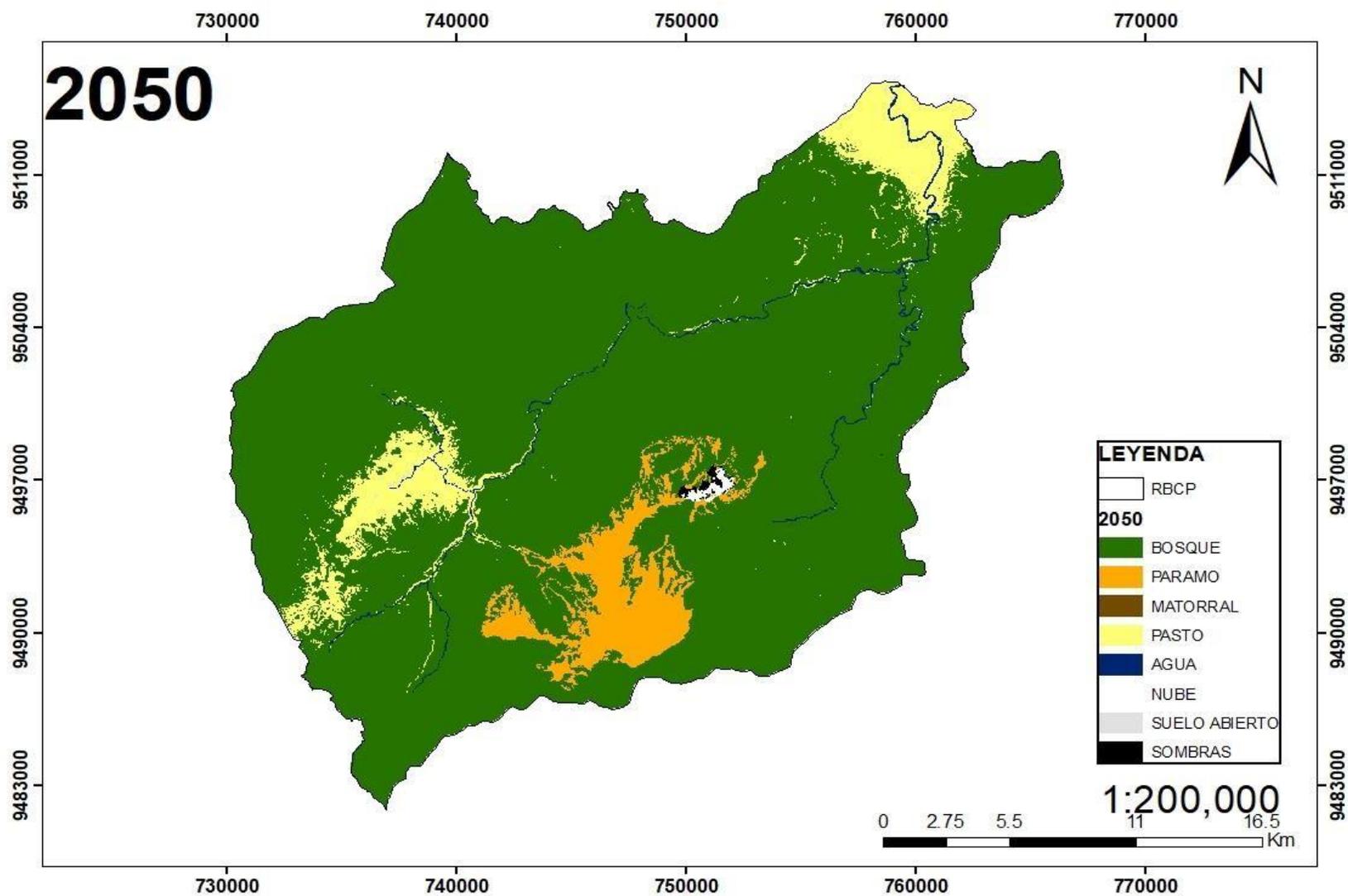


Figura 23. Mapa de uso del suelo 2050



## 5. DISCUSIÓN

En el presente estudio la información obtenida muestra la dinámica de la cobertura de bosque y sus futuras predicciones de cambio y uso del suelo durante el periodo 1986-2050 en la Reserva Biológica Cerro Plateado, parroquia Nuevo Paraíso Provincia de Zamora Chinchipe.

### **Uso actual del suelo y cobertura vegetal al año 2018, 2000 y 1986**

En la actualidad el área de estudio posee una cobertura forestal importante, la misma que fue verificada con la información oficial de Ecuador, donde hace alusión a la región amazónica de poseer el mayor porcentaje de cobertura forestal del país (MAE, 2012). Sin embargo, en la región amazónica hacia el sur del país, se ha evidenciado cambios drásticos en la cobertura vegetal, motivada por la colonización iniciada en los años sesenta (Palacios, 1996).

Estos cambios representan dinámicas muy complejas dependiendo del tipo de cobertura, las interacciones ecológicas, físicas, ambientales y de las actividades socioeconómicas (Guerrero *et al.*, 2008). En cuanto al uso actual del suelo para el año 2018, se identificó que el 87,61% del total del territorio, corresponde a cobertura de bosque (tabla 3), lo que resulta de vital importancia para la conservación de bosques y conectividad de la biodiversidad.

El área de pastos corresponde a las actividades agrícolas y pecuarias, donde la ganadería extensiva es el principal uso del territorio y cubren el 5,90% del territorio. Diversos cultivos tales como: naranjilla, yuca, plátano, cacao son característicos en el sector, puesto que sirven para su comercialización (PDYOT Nuevo Paraíso., 2015).

Para el año 1986 la cobertura de bosque (Tabla 3), cubre el 93,09%, mientras que el pasto plantado ocupa un 0,56%; posteriormente para el año 2000 la cobertura forestal era del 91,44% y los pastos el 2,15%, a sabiendas que estas son las clases más importantes identificadas en el estudio. Cabe mencionar que para estas fechas las categorías de infraestructura vial eran muy bajas, (Buitrón, 2011). El uso de suelo y la deforestación en tierras de colonos están asociados a la

apertura de vías, acceso a mercados, o ciclos de vida de los hogares (Mena *et al.* 2016; Messina *et al.* 2016).

### **Análisis de deforestación**

Sierra (2013) señala que la caída de la deforestación en el país se debe a diferentes factores: 1) intensificación de sistemas productivos rurales, 2) mejoras en la accesibilidad a áreas urbanas, 3) caída de las tasas de natalidad, y 4) el cierre de fronteras de colonización; además, menciona que el riesgo de deforestación aumenta en las zonas de colonización Norte y en los territorios indígenas en el Centro y Sur de la Amazonía.

Estos cambios se derivan del establecimiento de la Reforma Agraria, en la que se incitaba a la ocupación de tierras. Lo que posteriormente ayudaba a legalizar el predio ocupado y calificaba a los colonos como dueños legales. La aplicación de esta política, hasta el día de hoy, es lacausante de los cambios producidos, logrando la transformación irreversible del bosque amazónico (Sierra, 2016; Albán, 2015).

Con este estudio, se determina que la tasa de deforestación en la Reserva Biológica Cerro Plateado para el periodo 1986-2000 es de -0,057% y para el período 2000-2016 es de -0,137%; el mismo que se encuentra dentro del 0,41% de tasa de deforestación establecida para la Amazonía ecuatoriana para el año 2001 (Verweij *et al.*, 2014). En el primer periodo la tasa de deforestación es más baja en relación al segundo, en el cual se incrementa en más de la mitad. Este proceso se atribuye a la construcción de la vía que va desde la comunidad de Las Orquídeas a Nuevo Paraíso, inaugurada en 2010. De esta forma se considera que la construcción de vías ha contribuido la pérdida de bosques tropicales al abrir las áreas forestales a la tala y la conversión agrícola (Cajamarca, Paredes, Cabrera y Guananga 2019). Por consecuencia esto ha acelerado el proceso de deforestación en la zona de estudio.

En otro estudio similar realizado en “el Shaimi” en el periodo 1986-2010, la tasa de deforestación calculada es 0,16%; proceso elaborado bajo la interpretación de fotos aéreas (Ruiz, 2014). Entre Ruiz (2014) y la presente investigación, la tasa de deforestación es similar para el primer período (0,16% versus 0.057%) para el primer periodo de 1986-2000, para el segundo período (0,16% versus 0.13%) para el segundo periodo 2000-2018. Esa diferencia puede atribuirse a varios factores, tales como los períodos evaluados (24 años para Ruiz (2014), 32 años para el presente estudio).

### **Análisis del cambio de uso del suelo en los periodos 1986 – 2000 y 2000- 2018**

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que, el bosque a pesar de representar el mayor porcentaje de la superficie, ha disminuido y a su vez se ha transformado hacia otras coberturas, principalmente a pastos las cuales se concentran en la zonas bajas de la parroquia y son las coberturas que han presentado mayores ganancias, es decir han contribuido de forma directa al cambio observando la gráfica de cambios en la figura 12, probablemente debido al aumento continuo de asentamientos humanos. Además, el incremento de la superficie destinada a actividades agropecuarias (Quiroz, 2015). Sin embargo para el segundo periodo 2000 y 2018, el cambio fue mucho más evidente la cobertura de pasto ha representado mayor ganancias observando la gráfica de cambios en la figura 15.

Cabe mencionar que para este periodo el crecimiento demográfico y la infraestructura vial ha ido en aumento por ende las necesidades básicas de la población es cada vez mayor. Si bien no existe una teoría única que explique totalmente la deforestación y el cambio del uso de la tierra (Lambin *et al.*, 2010; Moran y Ostrom 2005), la colonización es una de sus causas según Brondizio *et al.* (2002).

Esta información se puede corroborar con el análisis de datos históricos de la superficie de bosque nativo en Ecuador continental, que presenta una disminución de su cobertura entre 1990-2016 (MAE, 2017), a causa de los cambios de bosque a tierra agropecuaria. Sierra (2013) menciona

que el área deforestada en el país fue transformada en áreas agropecuarias, dado que entre 1990 y 2010 la productividad agropecuaria creció de una forma continua. Así mismo, Eguiguren, Fischer y Günter (2019) mencionan que la conversión de bosques a tierras agrícolas, es la principal causa que afecta a los bosques de la Amazonía ecuatoriana. En la zona de estudio, luego de talar el bosque, la conversión de uso más extensa fue hacia los pastos. Sostienen De Jong, Borner, Pacheco, Benno Pokorny y Sahagún (2011) que esta trayectoria de uso se da especialmente en fincas de pequeños propietarios. La frontera agrícola, siendo el uso del suelo que ha cambiado como resultado de la conversión de bosque a pastos (Freile et al., 2014).

Un tema importante que se determinó en la investigación es la representación espacial del cambio, a través de un mapa de escala continua de 0 a 1, mientras más se acerca a uno, la tendencia es más pronunciada. Considerando que el cambio principal se dio de bosque a pastizales en el periodo 2000-2018 y se observa en la figura 20. Este cambio está dado en las cercanías de los centros poblados.

### **Escenarios futuros de deforestación**

El módulo LCM del software TerrSet representa eficazmente la magnitud, localización y la extensión del cambio de cobertura y uso del suelo analizado (Roy *et al.*, 2014). En base al resultado de la calibración del modelo en el periodo 1986-2000, se generó una imagen clasificada al 2018, esta imagen se comparó con la imagen real de la clasificación del 2018, lo que indica que los datos espaciales entre lo estimado y lo real tiene una correlación directa. En la tabla 6, se observa la similitud determinada, esto permitió estimar los mapas de cobertura vegetal al 2050, considerando los intervalos de tiempo de cinco años.

Los escenarios generados indican que las coberturas, esto es, bosque, páramo y vegetación arbustiva se mantendrán. Se debe principalmente a la inaccesibilidad por la compleja topografía, falta de infraestructura vial y condiciones ambientales (Curatola Fernández *et al.*, 2015). El modelo de proyecciones de uso del suelo permitió generar la tendencia de la categoría bosque el mismo

que explica que esta categoría va a continuar reduciéndose en superficie, donde el cambio principal será provocado por la implementación de áreas de pastos. La tasa de deforestación estimada para esta fecha es de 0.44%, pero esto podría elevarse de acuerdo a cambios que se presenten en el territorio, ya sea por la construcción de nuevas vías (Freile *et al.*, 2014).

En otro estudio, realizado por Condo y Silva (2006), se estima una tasa deforestación al 2050 de 1,5%, proceso elaborado bajo el entorno de trabajo de GEOMOD. En ambos casos, la principal causa que motiva la deforestación es la apertura de vías. A esto se suma la ampliación de la frontera agrícola y políticas forestales inadecuadas que en la década del 80 exigían que el 70% de las fincas estuvieran cultivadas para otorgar títulos de propiedad de la tierra (Condo y Silva, 2006). Los procesos de deforestación han sido acelerados, teniendo a la demanda por los recursos del bosque el principal factor de incremento en la probabilidad de deforestación (Etter, Mcalpine, Phinn, Pullar y Possinham, 2006).

Es de vital importancia mencionar que la simulación que se desarrolló para un periodo de tiempo significativo (30 años) para conseguir una mejor predicción (Roy *et al.*, 2014), y por ende conseguir resultados referentes a probabilidades muy cercanas a la realidad, no obstante estas probabilidades podrían aumentar de acuerdo a la dinámica de las actividades antrópicas que presente Ecuador continental en el transcurso del tiempo.

## 6. CONCLUSIONES

- La cobertura de uso del suelo en la Reserva Biológica Cerro Plateado que han experimentado cambios son los bosques puesto que para el año 1986 esta cobertura ocupaba 93.09% con 62534.31 ha, en el año 2000 representaba un 91,44% y finalmente al año 2018 esta cobertura disminuyó a un 87,61% lo que representa la disminución de cobertura vegetal; observándose una tasa baja en comparación con las tasas de deforestación mostradas a nivel provincial y nacional.
- En el periodo de 1986-2000 los bosques presentaron pérdidas de 1349 ha; mientras que la cobertura de pastos obtuvieron ganancias de 1329 ha. Por otro lado en el periodo 2000 y 2018 los bosques tuvieron mayores pérdidas de 3290 ha con respecto al primer periodo por consiguiente los pastos alcanzaron mayores ganancias de 3235 ha.
- Los cambios más significativos fueron de bosque a pasto y se dieron en el periodo 2000 y 2018 alcanzando una deforestación anual de 183.63 ha; mientras que en el primero periodo se obtuvo una deforestación anual de 79.26 ha.
- El índice de Kappa que se obtuvo para las dos clasificaciones tuvo un valor de 0.84 para el primer periodo y 0.80 para el segundo periodo dando como resultado una clasificación bastante precisa dentro de los rangos establecidos según dicho coeficiente.
- Los mapas de tendencia de la deforestación muestran espacialmente, los sitios de ubicación de las comunidades y vías de acceso como las zonas de mayor cambio de uso del suelo.
- La imagen de uso del suelo estimada al 2018, tuvo un porcentaje de certeza del 38%, que se considera aceptable para la estimación del cambio de uso del suelo en base a la modelación realizada con Land Change Modeler (LCM).
- El incremento de las actividades antropogénicas: actividades agropecuarias, apertura de carreteras y el aumento de zonas pobladas, son las principales causas de la pérdida

de bosque y por consiguiente la deforestación.

- La tendencia de deforestación estimada al año 2050 es de 0.43% y se determinó que las áreas de bosque van a disminuir por el incremento de pastos, siendo la ganadería la principal actividad productiva que predomina como conductor de este cambio.

## **7. RECOMENDACIONES**

- Generar información confiable a través de la cuantificación y el mapeo de deforestación en zonas de importancia ecológica, puesto que la información generada puede ser utilizada como herramienta de apoyo en estudios orientados a la planificación.
- Realizar recorridos de campo donde se identifique las zonas de explotación forestal, y sean corroboradas con los datos del Ministerio del Ambiente, con fines de analizar la venta de madera y con esto minimizar la ampliación de la frontera agrícola.
- Utilizar datos de otros satélites como el Sentinel 1 de la Agencia Espacial Europea (ESA) a través de su programa COPERNICUS, que son imágenes de ópticas y de radar, tienen cobertura cada cinco días, y su utilidad es importante para esta zona ya que la mayor parte del tiempo pasa nublado.
- Ajustar el modelo de deforestación con la integración de caminos de herradura que están dentro de la zona de estudio y considerar también los medios de ingreso fluviales y que son una limitante para modelarlos en el módulo LCM.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Acevedo, P., & Delibes, M. (2013). Efectos de los cambios en los usos del suelo en las especies cinegéticas en el sur de España: repercusiones para la gestión. *Ecosistemas*, 22(2), 33–39. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-2.06>
- Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., y Vargas Bolaños, C. (2015). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo Flash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53). <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>.
- Angelsen, A. y Kaimowitz D. 2001. “Introduction: The Role of Agricultural Technologies in Tropical Deforestation.” *Agricultural Technologies and Deforestation*, 1–17
- Armenteras, D., González, TM., Retana, J., Espelta, J. (2016). Degradación de bosques en Latinoamérica: Síntesis conceptual, metodologías de evaluación y casos de estudio nacionales. IBERO-REDD+
- Barrantes G., H. Chaces y M. Vinueza. 2010. *El bosque en el Ecuador: una visión transformada para el desarrollo y la conservación*. Quito, Ecuador. 47p.
- Brondizio, E., McCracken, D., y Morán, E. (2002). Land Use Patterns on an Agriculture Frontier in Brasil: Insights and examples from a demographic perspective. En Charles Wood y R. Porro (eds.), *Land Use and Deforestation*.
- Brown, L., Sierra, R., Douglas Southgate, D. y Lobao, L. (1992). Complementary perspectives as a means of understanding regional change: Frontier Settlement in the Ecuador Amazon. *Environment and Planning* 24 (7): 939-961.

- Buitron, V. (2011): Cambios de usos del suelo (1986-2010) y estructura de asentamientos saraguros en el Alto Nangaritza. Disertación de grado. Escuela de Geografía – PUCE. Quito, Ecuador.
- Cabello, J., & Parruelo, J. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas* , 1-2
- Campbell, J., y Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. (Guilford Press, Ed.) (Quinta). New York.
- CEPAL, N. (1991). Inventarios y cuentas del patrimonio natural en América Latina y el Caribe. CEPAL. Obtenido de <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/2127>
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Charlotte, E., Guimaraes, D., & Hirsch, A. (2016). Uso de Sistema de Informaciones Geográficas para espacialización de datos. (PROCISUR, Ed.). Montevideo-Uruguay
- Chomitz, K.M. y D.A. Gray. (1996). Roads, Land Use, and Deforestation: A Spatial Model Applied to Belize. *The World Bank Economic Review*, Vol. 10, No. 3:487-512.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid, España: RIALP.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de la Teledetección Espacial*. Ediciones RIALP S.A. Madrid-España. 115. p.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. 1era.Edición –Mayo. Editorial Ariel S.A.-España

- Chuvieco, E. (2009). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*. Fundamentals of Satellite Remote Sensing. Taylor & Francis Group.
- Clark University. (s.f.). Land Change Modeler in TerrSet. Obtenido de TerrSet Brochure: Geospatial Monitoring and Modeling System: [http://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/03/TerrSet18-2\\_Brochure\\_WEB.pdf](http://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/03/TerrSet18-2_Brochure_WEB.pdf)
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices* (Second Edition). CRC Press.
- Corrales, R., & Ochoa, V. (2017). Cálculo de reflectancia en imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE. *Ciencias Espaciales*, 9(1), 85. <https://doi.org/10.5377/ce.v9i1.3127>
- Curatola Fernández, G., Obermeier, W. A., Gerique, A., López Sandoval, F., Lehnert, L. W., Thies, B., y 64
- Bendix, J. (2015). Land Cover Change in the Andes of Southern Ecuador-Patterns and Drivers. *Remote Sensing*, 7, 2509–2542.
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva, guía para SIG y procesamiento de imágenes*. Worcester. USA.
- Eastman, J. R. (2016). Modeling REDD Baselines using IDRISI's Land Change Modeler: 1-2
- Echavarria, F. R., 1998. *Monitoring Forests in the Andes Using Remote Sensing: An Example from Southern Ecuador*, *Nature's Geography: New Lessons for Conservation in Developing*
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva, guía para SIG y procesamiento de imágenes*. Worcester. USA.

Eguiguren, P., Fischer, R., & Günter, S. (2019). Degradation of Ecosystem Services and Deforestation in Landscapes With and Without Incentive-Based Forest Conservation. <https://doi.org/10.3390/f10050442>

Erdas Imagine. (2001). Field Guide, Spanish. Bogotá, Colombia.

Escalona, M., Peña, F., Pincheira, J., & Rebolledo, G. (2011). Cambio de uso del suelo en los geosistemas de la cuenca costera del río Boroa (Chile) entre 1994 y 2004. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo* from <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S1853.86652011000200001&lang=es&site=eds-live>

Etter, A., C. Mcalpine, S. Phinn, D. Pullar y H. Possinham. (2006). characterizing a tropical deforestation wave: a dynamic spatial analysis of a deforestation hotspot in the Colombian Amazon. *Global Change Biology* 12, 1409-1420.

FAO. (2001). Evaluación de los recursos forestales mundiales 200. Roma.

FAO. (2016a). *El estado de los bosques del mundo*, 36. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia. Recuperado de <http://www.fao.org>

FAO. (2017). Monitoreo de la deforestación y degradación forestal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia. Recuperado de <http://www.fao.org>

Freile, J., Moscoso, P., y Félix, C., (2010). *La magia de los Tepuyes del Nangaritza: Una guía para conocer a sus habitantes*. Quito: Conservación Internacional Ecuador

Finer, M., Jenkins, C., Pimm, S., Keane, B., y Ross, C. (2008). Oil and Gas Projects in the Western Amazon: Threats to Wilderness, Biodiversity, and Indigenous Peoples. *PLoS*

49

ONE, 3(8), e2932. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002932>

Galindo, G., Espejo, O., Vergara, L., y Cabrera, E. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia*. Bogotá. Recupedo de <http://www.scripto.com>

Geist H. y E. Lambin. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*: 52(2):143-50

Guerrero, G., O. Masera & J. F. Mas. 2008. Land use/Land cover change dynamics in the Mexican Highlands: current situation and long term scenarios. In: *Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions*. Paegelow, M. & M.

Henríquez L. 2012. Escenarios Futuros de uso de suelo para el análisis del efecto del cambio global en los recursos hídricos aplicado al acuífero de La Mancha Oriental. Tesis Master en Ingeniería hidráulica y Medio Ambiente Intensificación: Recursos hídricos. Universidad Politécnica de Valencia. España. 225 p

IGAC (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data

Jerves, A., & Machado, F. (2015). Aire por Pm10 de Cuenca-Ecuador. (F. de I. C. de la U. de Cuenca, Ed.). Cuenca-Ecuador.

Keating, P. L., 1998. Effects of Anthropogenic Disturbances on Páramo Vegetation in Podocarpus National Park, Ecuador. *Physical Geography* 19: 221-238.

Killeen, T., A. Guerra, A., Calzada, M., Correa, L., Calderon, V., Soria, L., Quezada, B. & Steininger, M. (2008). Total historical land use change in eastern Bolivia: who, where, when, and how much. *Ecology and Society*, 13, 16-27.

- Kissinger, G., Herold, M., De Sy., V. Drivers of Deforestation and Forest Degradation: A Synthesis Report for REDD+ Policymakers. Lexeme Consulting, Vancouver Canada, August 2012.
- Labrador, M., Évora, J., & Pérez, M. (2016). Satélites de teledetección para la gestión del territorio. (G. Canarias, Ed.). Canarias-España.
- Lambin, E., H. Geist y R. Rindfluss. (2010). Introduction: Local Process with Global Impacts. En Land-use and land-cover change. Local processes and global impacts, editado por Erik Lambin y Helmut Geist, 1-8. Berlín: Springer.
- Lambin, E.F., & P. Meyfroidt. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 3465-3472.
- Lao, B., & Peláez, D. (2018). La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica para el manejo de las tierras. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(1), 54.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation (Seventh). United States of America: WILEY.
- MAE. (2014). Guía Informativa de las Áreas Naturales Protegidas del Ecuador. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Quito, Ecuador.
- MAE. (2015a). *Cambio Climático y Uso de la Tierra*, 1–11. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Quito, Ecuador.
- MAE. (2016). Bosques para el Buen Vivir - Plan de Acción REDD+ Ecuador (2016-2025). Ministerio del Ambiente del Ecuador. Quito, Ecuador.

- MAE. (2017). Deforestación del Ecuador Continental periodo 2014-2016, 37. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Martinez, J., & Díaz, A. (2005). Fundamentos de Teledetección Espacial. Comisión Nacional Del Agua, 62. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mas, J., Gao, Y., & Pacheco, J. (2010). Sensitivity of landscape pattern metrics to classification approaches. *Forest Ecology and Management*, 259(7), 1215–1224. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.12.016>
- Mena, C., A. Barbieri, S. Walsh, C. Erlien, F. Lu y R. Bilsborrow. (2006). Pressure on the Cuyabeno Wildlife Reserve: development and land use/cover change in the Northern Ecuadorian Amazon. *World Development* 34 (10): 1831-1849.
- Olaya, V. (2014). Sistemas de información geográfica. Tomo I. Creative Commons Atributed.
- Oñate-Valdivieso, F., y Bosque J. 2010. Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios of hydrological modeling. *Journal of Hydrology* 395: 256-263.
- Pacheco, C., Valle, H., Delrieux, C., & Bianchi, G. (2014). *Procesamiento Inteligente de Imágenes Satelitales Métodos avanzados y acelerados de segmentación y fusión de información Resumen Contexto Introducción*. Workshop de Investigadores En Ciencias de La Computación, 16(December), 275. <https://doi.org/10.13140/2.1.4380.5764>
- Pdot Nuevo Paraíso. (2008). Obtenido de [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\\_SNI/data\\_sigad\\_plus/sigadplusdiagnostico/1160053520001\\_Gu%C3%ADa%20PDyOT\\_PARROQUIAL\\_NUEVO%20PARAISO%20-%20DIAGNOSTICO\\_27-10-2015\\_12-11-55.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/1160053520001_Gu%C3%ADa%20PDyOT_PARROQUIAL_NUEVO%20PARAISO%20-%20DIAGNOSTICO_27-10-2015_12-11-55.pdf)

- Paegelow M., Camacho M. y Menor T. 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje, *GeoFocus* 3, ISSN: Painter, L., T.M., Siles, A. Reinaga y R. Wallace. (2013). Escenarios de deforestación en el Gran Paisaje Madidi - Tambopata. Consejo Indígena del Pueblo Tacana y Wildlife Conservation Society. La Paz, Bolivia.
- Palacios, W. (1996). Cuenca del río Nangaritza, una zona para conservar. *Revista geográfica IGM*. 36:93-119.
- Parveen, S., Basheer, J., & Praveen, B. (2018). A Literature Review On Land Use Land Cover Changes. *International Journal of Advanced Research*, 6(7), 1–6. <https://doi.org/10.21474/ijar01/7327>
- Pohle, P., Gerique A. 2008. Sustainable and Non-sustainable Use of Natural Resources by Indigenous and Local Communities, in: Beck, E., Bendix, J.,
- Pontius R., y Malanson, J. 2005 Comparison of the structure and accuracy of two land change models, *International Journal of Geographical Information Science*, N° 19, Vol. 2, p 243-265
- Pontius, R. G. Jr., Boersma W, Castella J C, Clarke K, Nijs T D, Dietzel C, Zengqiang D, Fotsing E, Goldstein N, Kok K, Koomen E, Lippitt C D, McConnell W, Pijanowski B, Pithadia S, Sood A M, Sweeney S, Trung T N, Veldkamp A T, y Verburg P H. (2007) Comparing the input, output and validation maps for several models of land change. *Annals of Regional Science* 42: 11–7
- Pinos, N. (2017). Prospective land use and vegetation cover on land management - Case canton Cuenca. *Estoa*, 5(9), 2. <https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.02>
- Puerta R., J. Rengifo, y N. Bravo. 2013. Manual de ArcGis 10 Nivel Intermedio: Departamento

de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables. Perú. 117 p.

Quiroz, E. (2015). *Cambios del uso de suelo en el cantón Arajuno, Ecuador (2000, 2008 y 2013) Análisis enfocado en la nacionalidad Huaorani*. Universidad de Salzbug. Quito, Ecuador.

Rashed, T., & Juergens, C. (2010). *Remote sensing of urban and suburban areas*. USA: Springer Science & Business Media

Restrepo, C. and Gómez, N. 1998. Responses of understory birds to anthropogenic edges in a Neotropical montane forest. *Ecological Applications*. 8: 170-183. Pohle, P., Gerique A. 2008. Sustainable and Non-sustainable Use of Natural Resources by Indigenous and Local Communities, in: Beck, E., Bendix, J., Kottke, I., Makeschin, F., Mosandl R., (Eds.), 2008. *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador*. *Ecological Studies*, Vol: 198. Springer-Verlag. Berlin, pp. 347-361

Roy, H. G., Fox, D. M., & Emsellem, K. (2014). Predicting Land Cover Change in a Mediterranean Catchment at Different Time Scales. In B. et al Murgante (Ed.), *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2014*. *Lecture Notes in Computer Science (ICCSA)*. Springer, 315-330.

Rudel, T.K., Defries, R., Asner, G.P. & Laurance, W.F. (2009). Changing drivers of deforestation and new opportunities for conservation. *Conservation Biology*, 23, 1396-405.

Ruiz, L. (2014). *Uso del Suelo y deforestación en el Centro Shuar Shaima Impactos de los cambios demográficos y productivos, 1986-2010*. Facultad de Ciencias Humanas, Escuela de Ciencias Geográficas. PUCE. Quito-Ecuador.

Sahagún, J., H. Reyes, J.L. Flores y L. Chapa. (2011). *Modelización de escenarios de cambio*

potencial en la vegetación y uso de suelo en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí, México. *Journal of Latin American Geography* 10(2):65-86

Sánchez, P. M. (24 de Octubre de 2012). Teledetección enfocada a la obtención de mapas. Obtenido de teledetección espacio multitemporal: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/779/1/ti839.pdf>

Sangermano, F. y J. R. Eastman. (2012). A GIS framework for the refinement of species geographic ranges. *International Journal of Geographical Information Science* 26:39–55.

Sarmiento F. O. 2002. Antropogenic change in the landscapes of highland Ecuador. *Geographical Review*. 92: 213-222.

Sendra, J. (1994). Sistema de información geográfica. *Estudios Geográficos*, 55(214),201

Sierra, R. (2000). Dynamics and patterns of deforestation in the western Amazon: the Napo deforestation front, 1986–1996. *Applied Geography*, 20, 1-16.

Sierra, R. (2013). *Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010, y un acercamiento a los próximos 10 años*. Quito, Ecuador.

Silva, S., Arévalo, L., y Herrera, M. (2010). *Análisis Histórico de Cambios de uso de suelo, Cobertura vegetal y Determinación de escenarios futuros de deforestación en un área del bosque protector Alto Nangaritza*. PROFAFOR. Loja, Ecuador.

T. Camacho (Eds). *Environmental Science and Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 390 pp

United Nations. (1992). Obtenido de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>

- USGS. (2018). Landsat Missions Timeline | Landsat Missions. Retrieved December 5, 2018, from <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>
- Van Der Hoek, Y. (2017). The potential of protected areas to halt deforestation in Ecuador. *Environmental Conservation*, 44 (2124–130. <https://doi.org/10.1017/S037689291700011>
- Vargas-Sanabria, D., & Campos-Vargas, C. (2018a). Sistema multi-algoritmo para la clasificación de coberturas de la tierra en el bosque seco tropical del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), 58. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3497>
- Verburg P. y Overmars K. 2007 Dynamic simulation of landuse change trajectories with the CLUE-s model. In: Koomen, E., Stillwell, J., Bakema, A. and Scholten, H.J. (eds.). *Modeling Landuse Change. Progress and applications. The GeoJournal Library, Volume 90*. Springer. p 321-338.
- Verweij, P., M. Schouten, P. van Beukering, J. Triana, K. van der Leew y S. Hess. (2014). *Keeping the Amazon Forests standing: a matter of values*. Report commissioned by WWF Netherlands. 73p
- White, S. y Maldonado, F. (1991). El uso y conservación de los recursos naturales en los Andes del sur del Ecuador. *Investigación y desarrollo de montaña*, 37-55.
- Winrock Internacional. (2003). *Finalización de Líneas Base para Proyectos de Deforestación Evitada*. Arlington, USA
- Xie, Y., Sha, Z., & Yu, M. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, 1(1), 9–23. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005>

## 9. ANEXOS

**Tabla 7.** Tabulación cruzada de pixeles 1986-2000

Tabulación cruzada de pixeles									
Categoría	Bosque	Paramo	Matorral	Pasto	Agua	Nube	Sombra	Suelo abierto	Total
Bosque	1289143	3	2	1956	0	7	194	0	1291305
Paramo	72	38944	0	0	0	0	0	0	39016
Matorral	23	0	0	0	0	0	0	0	23
Pasto	14715	0	1	1929	0	0	52	0	16697
Agua	0	0	0	0	6712	0	0	0	6712
Nube	0	0	0	0	0	1253	0	0	1253
Sombra	103	0	0	6	0	0	3	0	112
Suelo abierto	0	0	0	0	0	0	0	920	920
Total	1304056	38947	3	3891	6712	1260	249	920	1356038

Chi-square = 5490185.5000, df = 49, P-Level = 0.0000, Cramer's V = 0.8605

**Tabla 8.** Tabulación cruzada proporcional

Tabulación cruzada proporcional									
Categoría	Bosque	Paramo	Matorral	Pasto	Agua	Nube	Sombra	Suelo abierto	Total
Bosque	0.9507	0	0	0.001	0	0	0.0001	0	0.9523
Paramo	0.0001	0.0287	0	0	0	0	0	0	0.0288
Matorral	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pasto	0.0109	0	0	0.001	0	0	0	0	0.0123
Agua	0	0	0	0	0.005	0	0	0	0.0049
Nube	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0009
Sombra	0.0001	0	0	0	0	0	0	0	0.0001
Suelo abierto	0	0	0	0	0	0	0	0.0007	0.0007
Total	0.9617	0.0287	0	0.003	0.005	0	0.0002	0.0007	1

Overall Kappa: 0.8484

**Tabla 9.** Tabulación cruzada de pixeles 2000-2018

Tabulación cruzada de pixeles									
Categoría	Bosque	Paramo	Matorral	Pasto	Agua	Nube	Sombra	Suelo abierto	Total
Bosque	1254745	15	20	7675	50	1	36	0	1262542
Paramo	7	39001	0	0	0	0	0	0	39008
Matorral	4	0	0	1	0	0	0	0	5
Pasto	35867	0	3	8709	0	0	76	0	44655
Agua	0	0	0	0	6662	0	0	0	6662
Nube	0	0	0	0	0	1252	0	0	1252
Sombra	674	0	0	312	0	0	0	0	986
Suelo abierto	8	0	0	0	0	0	0	920	928
Total	1291305	39016	23	16697	6712	1253	112	920	1356038

Chi-square = 5536099.0000, df = 49, P-Level = 0.0000, Cramer's V = 0.8637

**Tabla 10.** Tabulación cruzada proporcional

Tabulación cruzada proporcional									
Categoría	Bosque	Paramo	Matorral	Pasto	Agua	Nube	Sombra	Suelo abierto	Total
Bosque	0.9253	0	0	0.006	0	0	0	0	0.9311
Paramo	0	0.0288	0	0	0	0	0	0	0.0288
Matorral	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pasto	0.0264	0	0	0.006	0	0	0.0001	0	0.0329
Agua	0	0	0	0	0.005	0	0	0	0.0049
Nube	0	0	0	0	0	9E-04	0	0	0.0009
Sombra	0.0005	0	0	2E-04	0	0	0	0	0.0007
Suelo abierto	0	0	0	0	0	0	0	0.0007	0.0007
Total	0.9523	0.0288	0	0.012	0.005	9E-04	0.0001	0.0007	1

Overall Kappa: 0.8057

## Anexo 2.

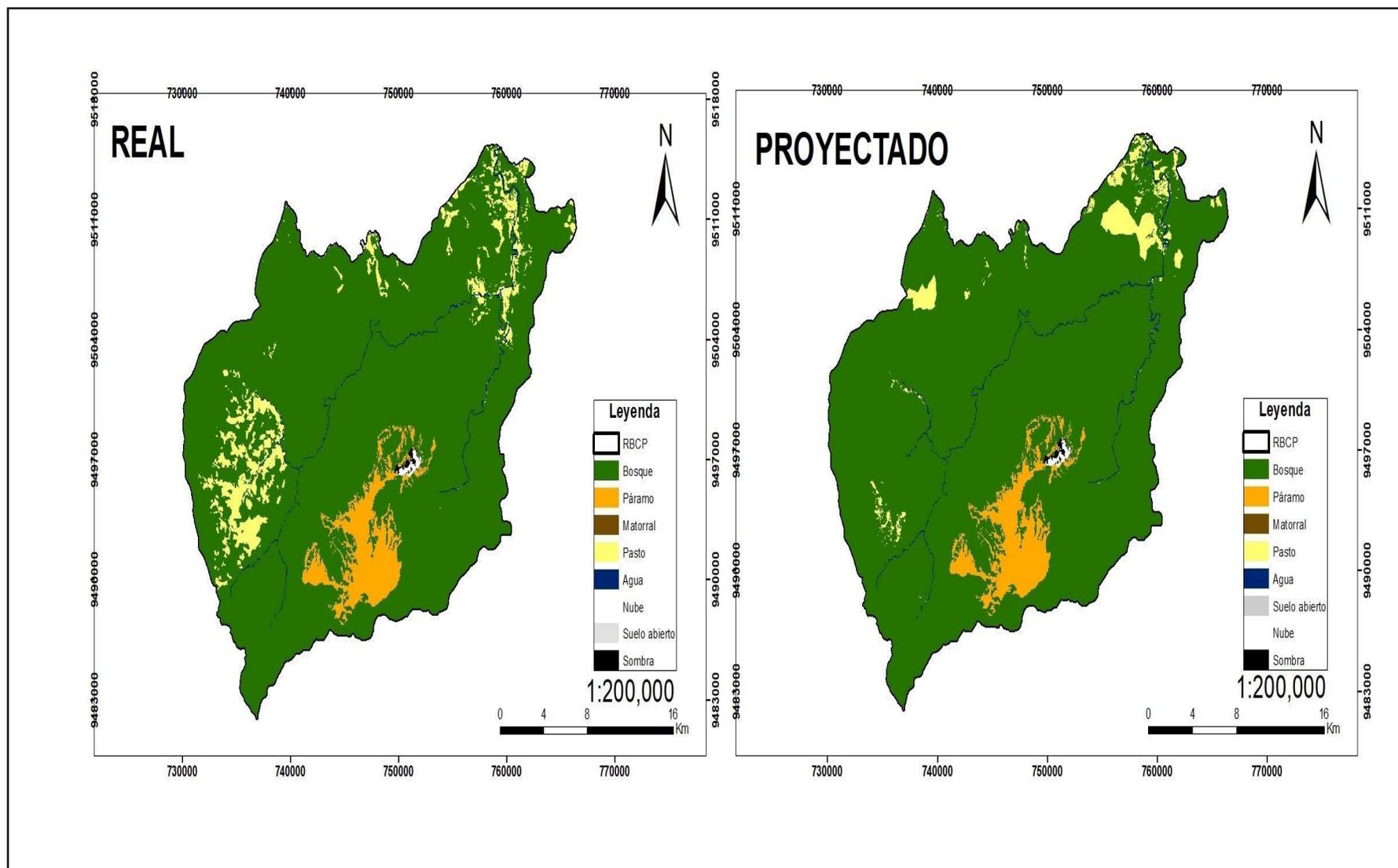
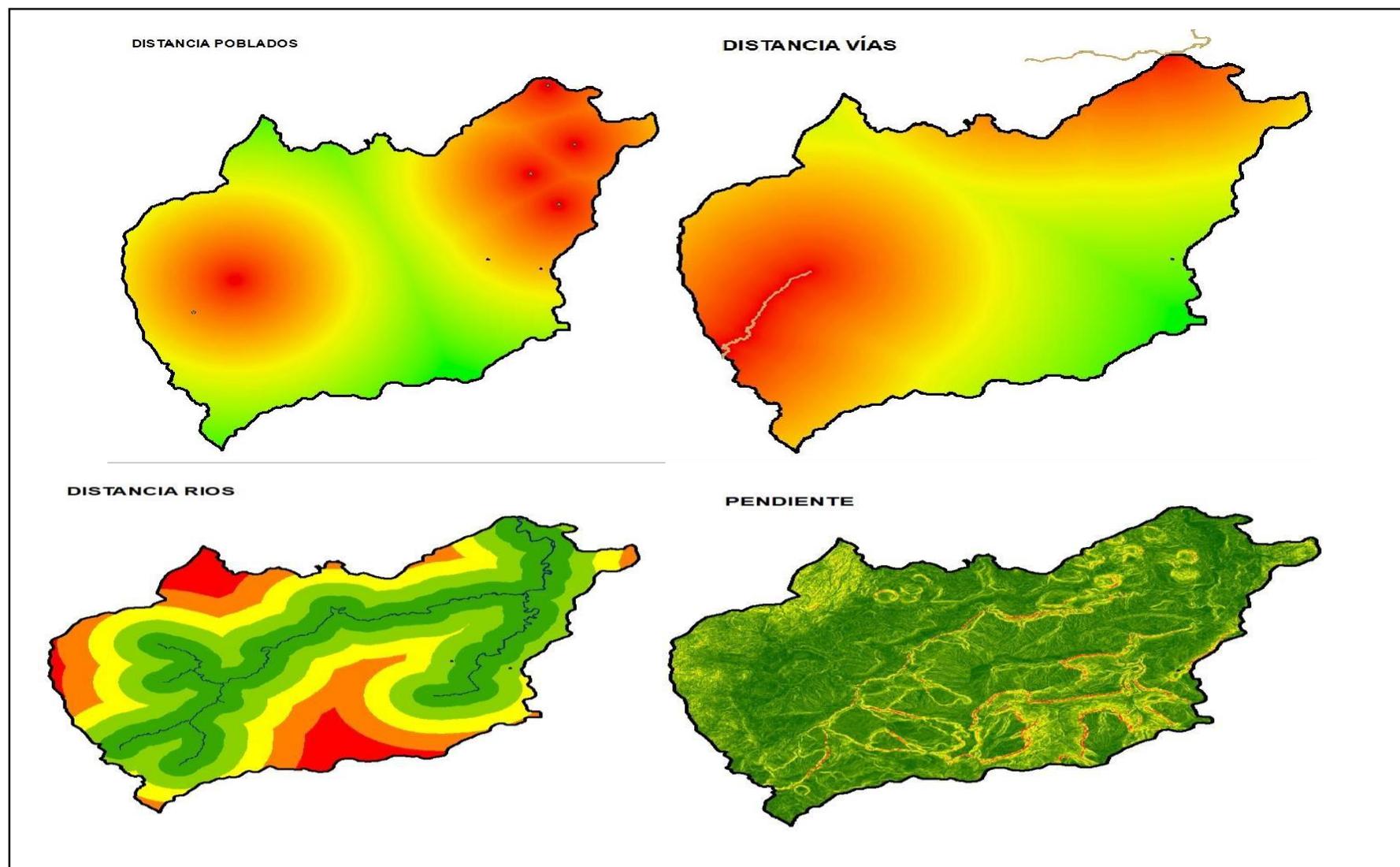


Figura 25. Mapa de relación real vs proyectado

## Anexo 4.

*Figura 26.* Variables explicativas

## Anexo 5.

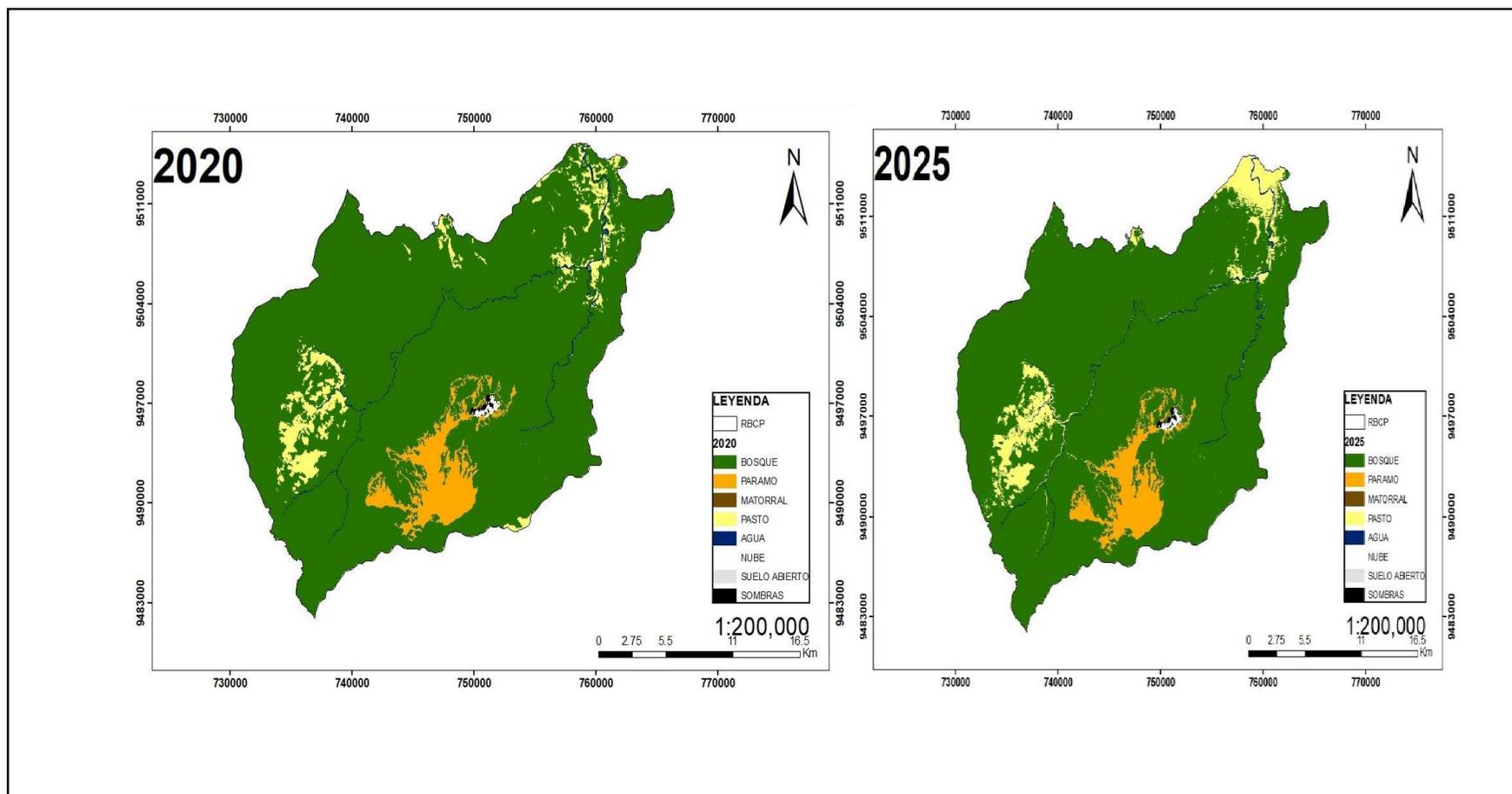


Figura 27. Mapas de uso del suelo 2020-2025

## Anexo 6.

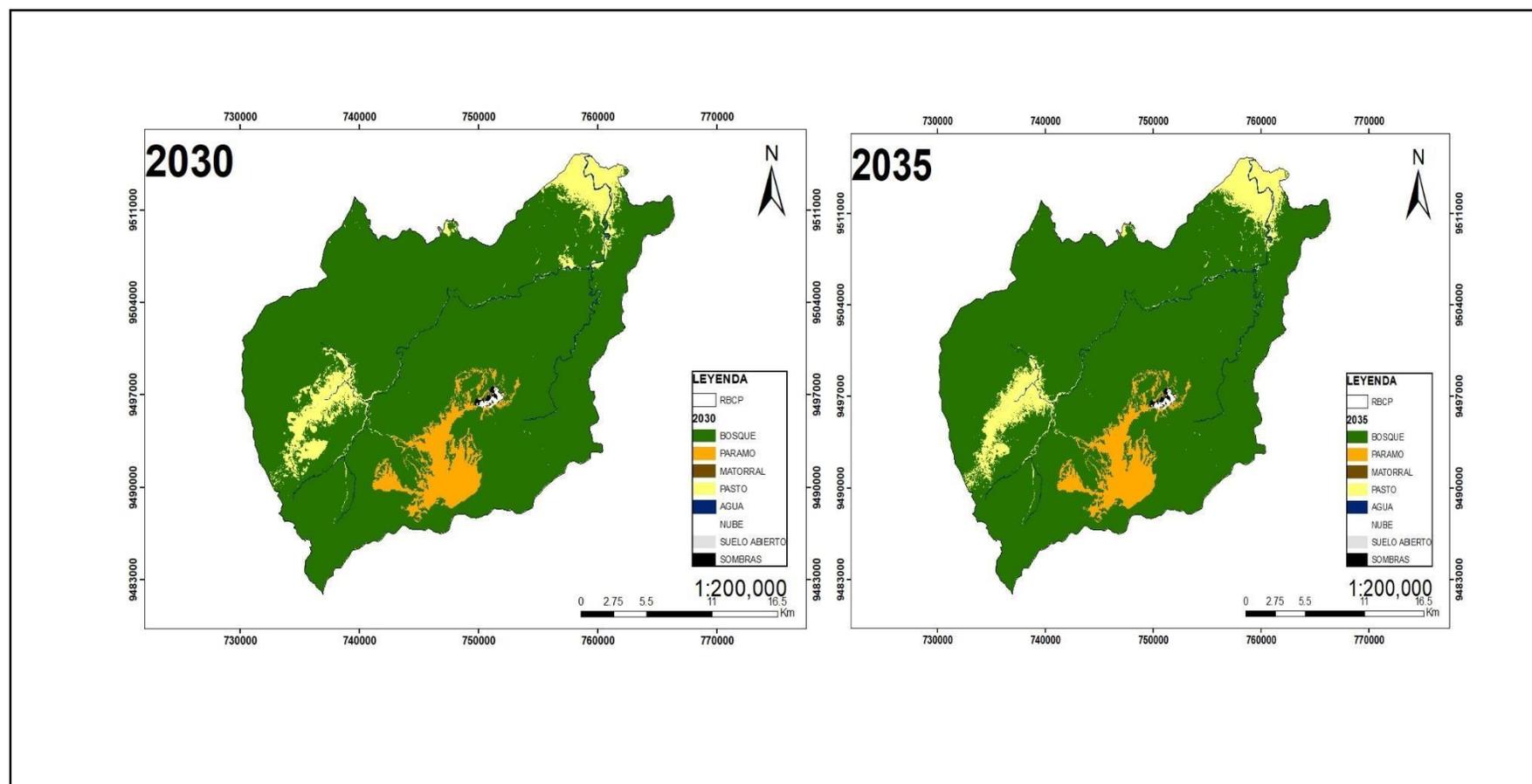


Figura 28. Mapas de uso del suelo 2030-2045

## Anexo 7.

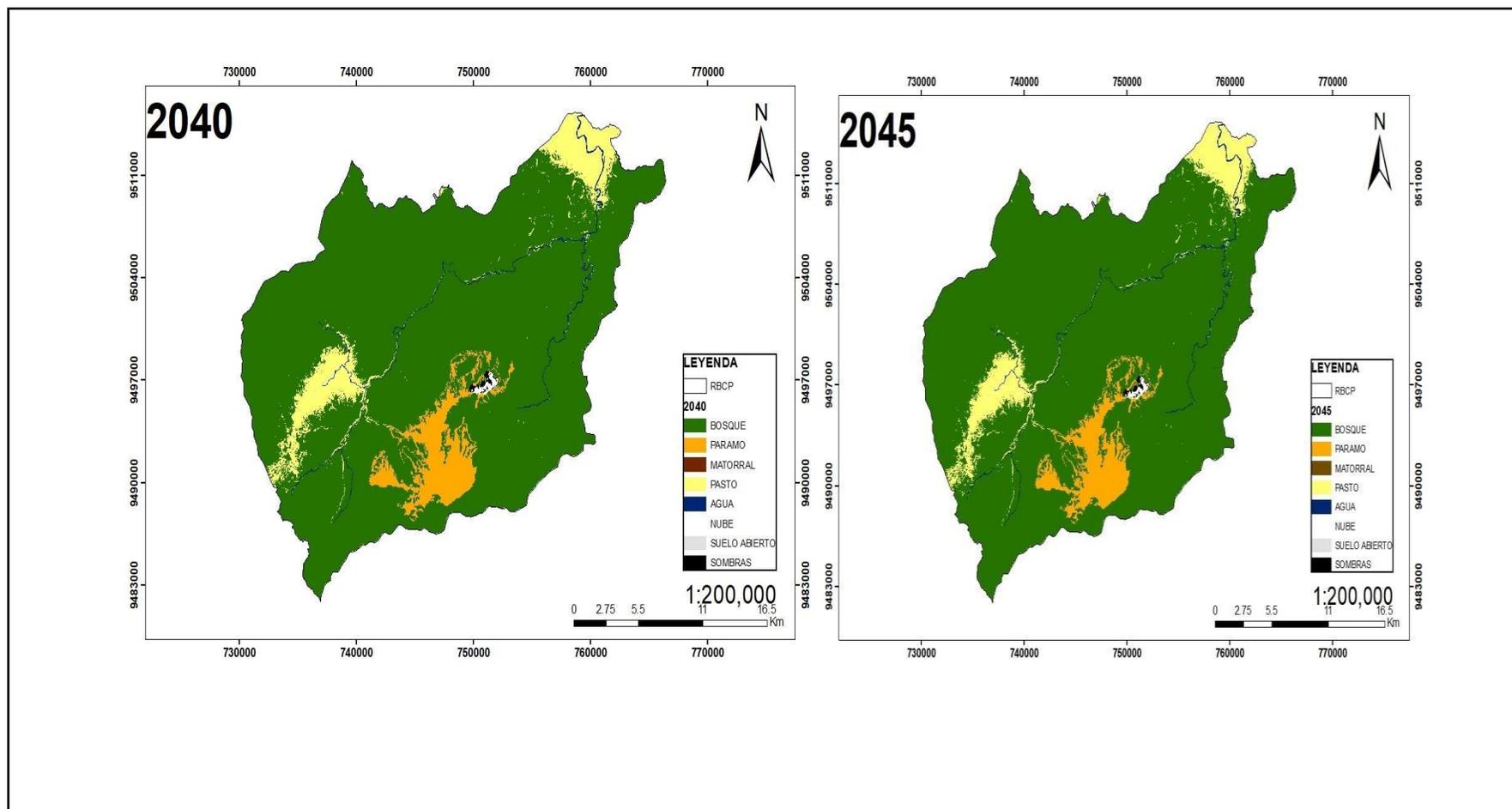
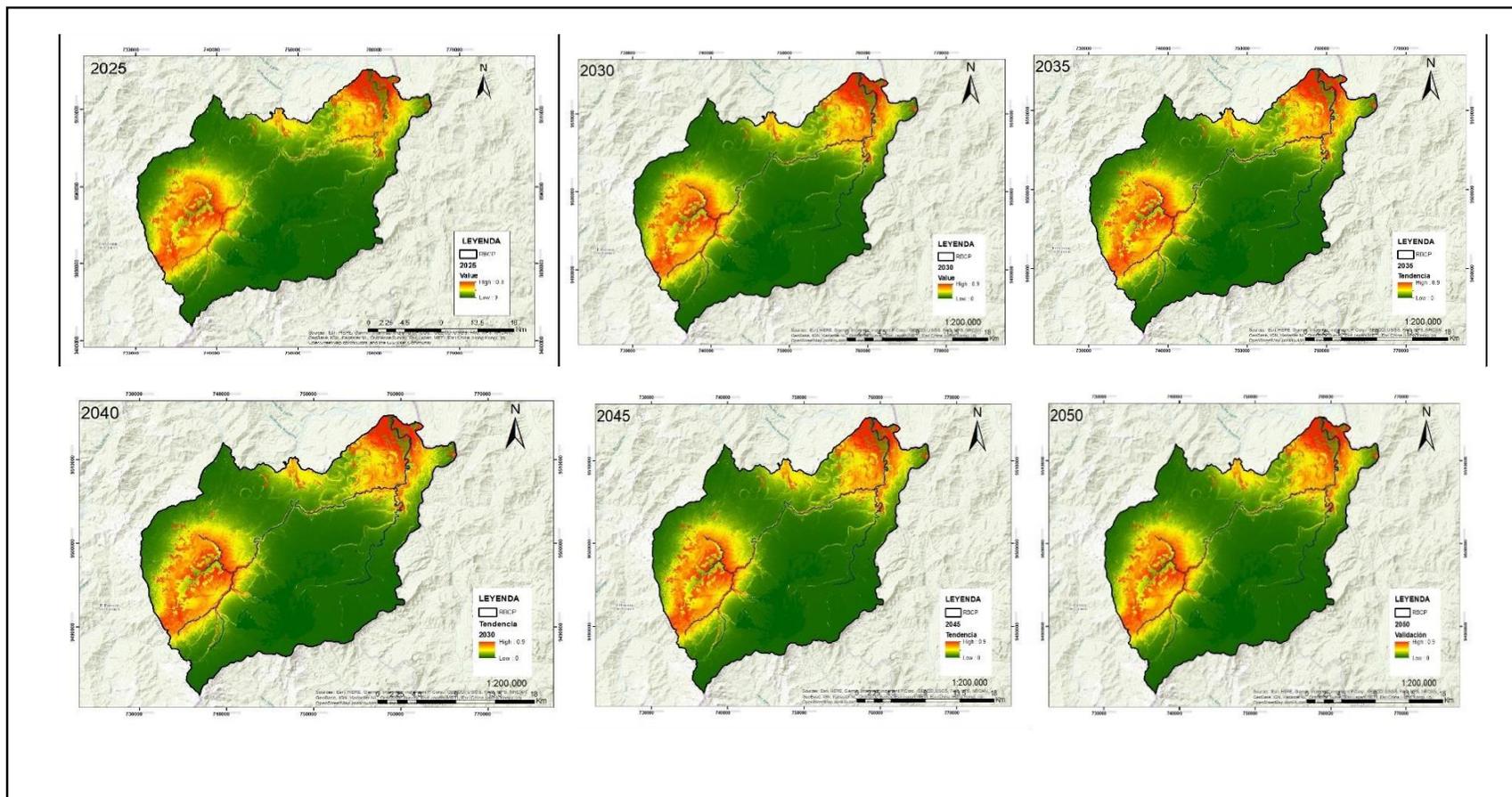


Figura 29. Mapas de uso del suelo 2040-2045

## Anexo 8.



*Figura 30.* Predicciones futuras al 2050

**Anexo 9.**

*Figura 31. Fotografías RBCP*